

Zuverlässigkeit von piezoelektrischen Mehrschicht-Aktoren in der Adaptronik

Vom Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation von

Dipl.-Ing. David Flaschenträger

aus Hanau

Referent: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Tag der Einreichung: 27.06.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 25.10.2016

Darmstadt 2017

D17

Danksagung:

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Tobias Melz, welcher nicht nur zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, sondern diese überhaupt erst ermöglicht hat. Die vielen, teilweise kontroversen Diskussionen mit ihm, trugen deutlich zur Abrundung und Vervollständigung dieser Arbeit bei.

Weiter möchte ich mich bei Herrn Dr. Jürgen Nuffer bedanken, welcher in den letzten Jahren nicht nur durch fachliche Diskussionen und Ratschläge diese Arbeit begleitet, sondern darüber hinaus mit seiner ausdauernden und stets positiven Art, maßgeblich zu meiner wissenschaftlichen und persönlichen Entwicklung beigetragen hat. Auch mein Interesse an Piezoaktoren und der technischen Zuverlässigkeit, die Grundlagen dieser Arbeit, ist auf ihn zurückzuführen.

Herrn Professor Stephan Rinderknecht möchte ich für die Übernahme des Korreferendariats danken.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Kollegen Thomas Pfeiffer und Matthias Rauschenbach bedanken. In den vergangenen Jahren teilten wir uns die Freuden und Leiden der Arbeit in unsrer Arbeitsgruppe Zuverlässigkeit des Fraunhofer LBF.

Auch meinen anderen Kollegen im Bereich Adaptronik des Fraunhofer LBF, allen voran meinen Büronachbarn Jan Hansmann, Tobias Röglin und Georg Stoll möchte ich an dieser Stelle danken. Sie haben nicht nur während der Arbeitszeiten dafür gesorgt, dass das Arbeitsklima im Büro, auch in stressigen Phasen, stets positiv und produktiv blieb.

Vielen Dank auch an die vielen anderen Kollegen des Fraunhofer LBF, welche mich bei jeder Gelegenheit durch viele kleine und große Taten immer wieder unterstützt haben und das immer gute Betriebsklima.

Inhalt

Inhalt	i
Abkürzungsverzeichnis	iv
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Forschung und Motivation	4
2.1 Zuverlässigkeit von Piezoaktoren	4
2.1.1 Ausfallmechanismen	4
2.1.2 Beschreibung der Lebensdauer von PMA.....	14
2.2 Ermittlung der Zuverlässigkeit	15
2.2.1 Step Stress Testing.....	15
2.2.2 Screening-Verfahren	16
2.3 Motivation	16
3 Grundlagen.....	18
3.1 Zuverlässigkeit.....	18
3.1.1 Kenngrößen.....	18
3.1.2 Zuverlässigkeitstheoretische Ansätze	22
3.1.3 Beschleunigte Testverfahren	27
3.2 Piezoaktoren	28
3.2.1 Ferroelektrische Werkstoffe	28
3.2.2 Aufbau von PMA.....	29
4 Experimentelle Methoden.....	30
4.1 Messeinrichtungen	30
4.1.1 Messen im statischen Betrieb	30
4.1.2 Messen im dynamischen Betrieb.....	30
4.1.3 Messablauf.....	33
4.2 Datenerfassung und Aufzeichnung.....	33
4.3 Probenbeschreibung	35
5 Ergebnisse und Diskussion der Teilergebnisse	38
5.1 Entwicklung eines Ablaufplans.....	38
5.2 Erfahrungswissen	41
5.2.1 Belastungen in der Adaptronik.....	42
5.2.2 Ausfallmechanismen in Abhängigkeit der Anwendung	45
5.3 Vortests	49
5.3.1 Planung und Durchführung	49
5.3.2 Ergebnisse der Vortests.....	50
5.3.3 Abschätzung des Einflusses der relativen Feuchte	52
5.3.4 Abschätzung des Temperatureinflusses	52
5.3.5 Abschätzung des Einflusses des elektrischen Feldes.....	53
5.3.6 Diskussion der Vortestergebnisse	54

5.4 Qualitatives Lebensdauermodell	55
5.5 Fachwissen	57
5.5.1 Fehlermechanismen	57
5.5.2 Einflussparameter	58
5.5.3 Zusammenfassung der Analyse des Fachwissens	60
5.6 Haupttests.....	61
5.6.1 Quantitative Ergebnisse der Haupttests.....	61
5.6.2 Reproduzierbarkeit einzelner Messergebnisse	62
5.6.3 Zwischenfazit der Haupttests.....	63
5.7 Quantitatives Lebensdauermodell	64
5.7.1 Bestimmung der mittleren Lebensdauer Λ	64
5.7.2 Annahmen als Grundlagen des quantitativen Lebensdauermodells	65
5.7.3 Grafische Bestimmung der mittleren Lebensdauern Λ	66
5.7.4 Analytisch Bestimmung der mittleren Lebensdauern Λ	67
5.7.5 Bestimmung des zeitlichen Ausfallverhaltens.....	68
5.7.6 Bestimmung der Aussagewahrscheinlichkeit.....	69
5.7.7 Normieren der Messdaten	69
5.7.8 Zwischenfazit des quantitativen Lebensdauermodells	72
5.8 Methodenvergleich	73
5.8.1 Quadratische Interpolation zur Beschreibung des Temperatur- einflusses	74
5.8.2 Berücksichtigung der Streuung der Ankerpunkte.....	77
5.8.3 Beschreibung der Ausfallcharakteristik mittels Log-Normalverteilung	79
5.9 Step Stress Monitoring (SSM)	81
5.9.1 SSM 1: Variation der Temperatur	84
5.9.2 SSM 2: Variation der relativen Feuchte	86
5.9.3 SSM 3: Variation von Feuchte und Temperatur	88
5.9.4 SSM 4: Untersuchung der Schrittweite	91
5.9.5 Zwischenfazit SSM.....	93
5.10 Verifiziertes PMA-Lebensdauermodell	95
5.10.1 Mittlere Lebensdauer: Einfluss von Temperatur und Feuchte.....	95
5.10.2 Beschreibung der Verteilungsfunktion	97
5.10.3 Beschreibung der PMA-Zuverlässigkeit und grafische Darstellung.....	98
5.10.4 Demonstration anhand eines Beispiels.....	99
6 Diskussion und Fazit.....	101
6.1 Vorgehensweise	101
6.2 Messwerterfassung	102
6.3 Streuung der Belastbarkeit.....	103
6.4 Anwendung des Ablaufplans.....	104
6.5 Einsparpotenzial gegenüber konventionellen Ansätzen	105
6.6 Verwendung von PMA in adaptronischen Systemen	105
7 Zusammenfassung und Ausblick	106

7.1 Zusammenfassung.....	106
7.2 Ausblick.....	107
Literaturverzeichnis.....	A
Abbildungsverzeichnis.....	H
Tabellenverzeichnis.....	J

Abkürzungsverzeichnis

GUI	Grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical User Interface)
HALT	Stark beschleunigtes Testen (engl. Highly Accelerated Life Testing)
HASS	Stark beschleunigtes Stress Screening (engl. Highly Accelerated Stress Screening)
MTTF	Mittlere Betriebsdauer bis zum Ausfall (engl. Mean Time To Failure)
PLZT	Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat
PMA	Piezoelektrischer Mehrschicht-Aktor
PMC	Piezoelektrischer Mehrschicht-Kondensator (engl. Piezoelectric Multilayer Capacitor)
PoF	Fehlermechanismus (engl. Physics of Failure)
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
r.H.	Relative Luftfeuchte
SSI	Überlagerung von Belastung und Belastbarkeit (engl. Stress Strength Interference)
SSM	Step Stress Monitoring

1 Einleitung

Die Adaptronik bietet Lösungsansätze, den steigenden Ansprüchen von Kunden in Hinblick auf Komfort, Funktion, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit in verschiedenen Branchen zu begegnen. Hierzu zählen vorrangig Systeme zur Lärm- und Vibrationsminderung [1]. Durch gesenkte Schall- und Vibrationspegel werden beispielsweise zusätzliche Einsparpotentiale an Strukturbau- teilen ermöglicht. Durch die Vielzahl der möglichen Anwendungsfelder, von stationären Anwen- dungen in der Produktionstechnik bis hin zu mobilen Anwendungen in der Luft, zu Wasser und an Land, ergibt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Belastungsszenarien für adaptronische Systeme und deren Komponenten. Diese Belastungsszenarien unterscheiden sich mitunter deut- lich hinsichtlich der wirkenden Umgebungs- und Betriebslasten voneinander und beeinflussen da- her die Zuverlässigkeit der Systeme erheblich. Um sicherzustellen, dass diese Systeme die gefor- derte Lebensdauer des gesamten Produktes (Kraftfahrzeug, Produktionsmaschine etc.) ausfallfrei überstehen, muss sichergestellt werden, dass auch deren jeweilige Komponenten wie Aktoren, Sensoren, Regelungs- und Leistungselektroniken sowie deren Verdrahtung über die gesamte Le- bensdauer eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit erreichen [2, 3].

Die Zuverlässigkeit piezoelektrischen Mehrschicht-Aktoren (PMA) ist für adaptronischen Anwen- dungen nicht ausreichend erforscht. Es besteht an dieser Stelle Bedarf, die Wirkung von verschie- denen Last- und Umwelteinflüssen auf die Zuverlässigkeit zu untersuchen. Es wurden zwar bereits seit den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts verschiedene Ausfallmechanismen von piezo- elektrischen Werkstoffen systematisch untersucht, solche die in der Adaptronik beobachtet wer- den, rückten jedoch erst sehr viel später in den Fokus von Wissenschaft und Industrie. Eine Beson- derheit adaptronischer Systeme stellt die Kombination von statischen und dynamischen elektri- schen Anregungssignalen dar, welche in Kombination mit Umweltlasten zu bisher unbekannten Ausfallmechanismen in PMA führen. Eine Betrachtung auf Materialebene allein ist nicht ausrei- chend, um belastbare quantitative Zuverlässigkeitskennwerte für das Gesamtsystem PMA zu er- mitteln, da erst durch das Zusammenspiel der einzelnen PMA-Komponenten die Ausfälle ermög- licht werden. Der hierzu alternative und übliche Ansatz, auf Basis großer Stichprobenumfänge experimentelle Zuverlässigkeitsdaten zu erzeugen, ist für viele adaptronische Anwendungen nicht zielführend, da die hierfür anfallenden Kosten der Verbreitung adaptronischer Systeme entge- genstehen. Des Weiteren lassen sich mit dem gegenwärtigen Kenntnisstand Zuverlässigkeitsdaten bis nur begrenzt von einem individuellen System und einer speziellen Anwendung auf ein anderes übertragen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der wirtschaftlichen und systematischen Bestimmung der PMA- Lebensdauer in adaptronischen Anwendungen und den damit verbundenen Einflüssen in Form von klimatischen und elektrischen Lasten. Das Ziel ist eine ingenieurmäßige Beschreibung der PMA-Lebensdauer unter den genannten Lasten, die zeit- und kosteneffizient den Entwicklungs-

prozess eines adaptronischen Systems unterstützt und in ihrer Genauigkeit der jeweiligen Anwendung angepasst werden kann. Wesentlicher Bestandteil ist die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur zeit- und kosteneffizienten experimentellen Ermittlung von Lebensdauerdaten und die Verknüpfung dieser mit Fachwissen aus unterschiedlichen Quellen zu einer modellhaften Beschreibung der PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der wirkenden Belastungen. Diese Arbeit setzt dabei auf den bestehenden Erkenntnissen zu den Ausfallmechanismen von Piezoaktoren auf und verzichtet auf eine erneute Untersuchung der selbigen. Die aus der Literatur verfügbaren Informationen zu den Ausfallmechanismen von Piezoaktoren sind essenziell für die spätere modellhafte Beschreibung der PMA-Lebensdauer. Zwar erlauben diese bislang keine quantitativen Schlüsse auf die Lebensdauer von einzelnen PMA, begründen aber einerseits die Planung der experimentellen Untersuchungen und erlauben andererseits Schlüsse auf das qualitative Ausfallverhalten, welches die Grundlage für die spätere Modellbildung ist.

Nach der Darstellung des aktuellen Stands der Forschung auf den Gebieten der Ausfallmechanismen von Piezoaktoren und Ansätzen zur Beschreibung der Zuverlässigkeit in Kapitel 2 folgen in Kapitel 3 wesentliche und für die weitere Arbeit relevante Grundlagen zu den Themen Piezoaktorik und Zuverlässigkeitstechnik. Das vierte Kapitel beschreibt die in dieser Arbeit für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Methoden und Werkzeuge. Im fünften Kapitel wird der für diese Arbeit entwickelte Ablaufplan und anschließend die einzelnen Schritte des Ablaufplans mit den jeweiligen Zwischenergebnissen dargestellt und diskutiert. Es wird ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, welches durch Kombination vorhandener Daten zu Fehlermoden und deren Ursachen und gezielten experimentellen Untersuchungen zu einem quantitativen Lebensdauermodell führt. Dieses ermöglicht, die durchschnittliche PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der betrachteten Umwelteinflüsse *relative Feuchte* und *Temperatur* zu schätzen. Hierzu wird in Kapitel 5.2 detailliert auf die eingangs erwähnten adaptronischen Umgebungs- und Betriebslasten eingegangen. Diesen fällt für diese Arbeit eine zentrale Bedeutung zu. So existiert bislang keine eindeutige und allgemeingültige Definition *adaptronischer Lasten*. Die jeweils wirkenden Lasten hängen von der individuellen Anwendung ab und können im Vorfeld nur teilweise abgeschätzt werden. Es wird in dieser Arbeit dargestellt, dass eine exakte Kenntnis der einzelnen Lasten und ihrer zeitlichen Verläufe nicht zwingend nötig ist, um die Lebensdauer des betrachteten Systems begründet zu schätzen. Grundlage für diese Annahme ist die Beobachtung, dass die Degradation von PMA auch bei unterschiedlichen Ausprägungen der wirkenden Lasten wie Temperatur, elektrische Anregung oder Feuchte stets ähnlich verläuft

Im weiteren Verlauf des fünften Kapitels wird die Planung unterschiedlicher Testreihen erläutert und die Ergebnisse mit dem vorhandenen Fachwissen abgeglichen und zusammengeführt. Die resultierende modellhafte Beschreibung der PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der Umweltlasten wird um eine Weibullverteilung zur Beschreibung des Ausfallverhaltens erweitert und diskutiert. Im Rahmen einer sich anschließenden Verifikation wird mit Hilfe eines Methodenvergleichs sowie

eines weiterentwickelten Screening-Verfahrens überprüft, ob die Beschreibung der PMA-Lebensdauer trotz des bewussten Verzichts auf eine umfangreichere statistische Absicherung genaue Ergebnisse für den betrachteten Fall liefert. Während die einzelnen Teilergebnisse bereits am Ende der jeweiligen Unterkapitel diskutiert werden, stehen im sechsten Kapitel das globale Vorgehen dieser Arbeit, der Ablaufplan und die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse auf andere Systeme im Fokus der Diskussion. Im siebten Kapitel folgen die Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der hier vorgestellten Arbeiten.

2 Stand der Forschung und Motivation

Im Folgenden wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung auf dem Gebiet der Ausfallmechanismen und darauf aufbauend der Zuverlässigkeit von PMA dargestellt. Anschließend werden aktuelle, beschleunigte Testverfahren kurz erläutert, ehe im weiteren Verlauf der Arbeit (Kapitel 5.9) ein neues Testverfahren für PMA entwickelt wird, welches auf den in Kapitel 2.2 vorgestellten Verfahren aufbaut.

Es wird ersichtlich, dass eine befriedigende Beschreibung der PMA-Zuverlässigkeit mit den derzeit verfügbaren Mitteln und Methoden nicht gegeben ist, so dass diese Lücken im Kenntnisstand einer schnelleren Verbreitung adaptronischer Systeme in Bereichen wie dem Kraftfahrzeug-, Flugzeug- oder Anlagenbau entgegenstehen. Die hieraus resultierende Motivation dieser Arbeit wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels dargestellt.

2.1 Zuverlässigkeit von Piezoaktoren

Die Zuverlässigkeit von ferroelektrischen Werkstoffen wurde seit den 1960er Jahren systematisch untersucht. Parallel zur Entwicklung von Aktoren und Sensoren auf PZT-Basis wurde seit Ende der 1980er Jahre auch die Verwendung ferroelektrischer Werkstoffe für elektronische Bauteile wie z. B. Kondensatoren und Speicherbausteine intensiv verfolgt und deren Zuverlässigkeit erforscht.

Während sich die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Aktoren auf PZT-Basis bis in die Nullerjahre dieses Jahrhunderts in erster Linie auf die Bereiche elektrische Ermüdung und mechanische Degradation konzentrierten, wurde im Bereich der Halbleiter- und Speicherindustrie bereits früher die Entwicklung von Leckströmen in ferroelektrischen Schichten sowie die zugrundeliegenden Mechanismen untersucht. Die Messung dieser Leckströme hat sich als geeignetes Mittel zur Bestimmung der Degradation und des Zustandes der beobachteten Probe herausgestellt, da sie klar quantifizierbar und messtechnisch auch im Betrieb gut zu erfassen ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind trotz der auf den ersten Blick unterschiedlichen Anwendung für die Bewertung der Zuverlässigkeit von PMA unter adaptronischen Bedingungen von Interesse. Daher sollen im Folgenden anhand ausgewählter Arbeiten die Ausfallmechanismen von ferroelektrischen Werkstoffen und PMA dargestellt und erläutert werden.

2.1.1 Ausfallmechanismen

Bindig führt Ausfälle von PMA auf insgesamt vier Fehlerbilder zurück [4]. Neben Defekten des mechanischen Aufbaus infolge von Mikrorissen oder Brüchen, elektrischer Ermüdung und thermischer Depolarisation wird letztlich die unzulässige Zunahme des Leckstroms genannt.

2.1.1.1 Mechanisch induzierte Schädigung (Mikro-/Makro-Risse)

Infolge von mechanischen Belastungen können an verschiedenen Stellen in PMA Risse und Brüche auftreten. Auch bei Piezoaktoren anderer Bauart sind mechanische Defekte grundsätzlich möglich. Allgemein kann man unterscheiden zwischen mikroskopischen Brüchen oder Rissen, die häufig in Randbereichen der Keramik auftreten, makroskopischen Schäden im Inneren des massiven Materials, Defekten der Grenzschicht zwischen Elektrode und Piezomaterial sowie mechanischen Schädigungen der Elektroden als solchen.

Einschichtige Piezo-Aktoren weisen in der Regel ein großes Verhältnis von Grundfläche zu Dicke auf. Durch die Querkontraktion des piezoelektrischen Materials wird beim Anlegen einer elektrischen Spannung die Elektrode gestaucht oder gedehnt. Die Elektroden selbst wiederum bestehen in der Regel aus einer wenige μm dicken massiven Metallschicht, die aufgesputtered oder -gedruckt und anschließend thermisch nachbehandelt wurde. Durch Verformungen, die von außen auf den Piezoaktor aufgeprägt werden (z. B. bei Biegung) kann diese Metallschicht einreißen, was nicht-kontaktierte Bereiche des Aktors nach sich zieht [5]. In Abhängigkeit von Belastung und Lebensdauer treten derartige Risse beinahe zwangsweise auf, was bei kommerziellen Produkten durch eine zweite Elektrodenschicht, die z. B. aus einem leitfähigen Flies oder Metallgitter besteht, entschärft wird [6]. Diese zweite Elektrode weist eine höhere Dehnbarkeit auf als die Metallschicht, die direkt mit dem keramischen Grundwerkstoff verbunden ist. Bei einem Bruch der ersten Elektrode werden die einzelnen Bruchstücke miteinander über die zweite Elektrode elektrisch verbunden und somit wird sichergestellt, dass die Keramik nahezu vollständig elektrisch aktiv bleibt.

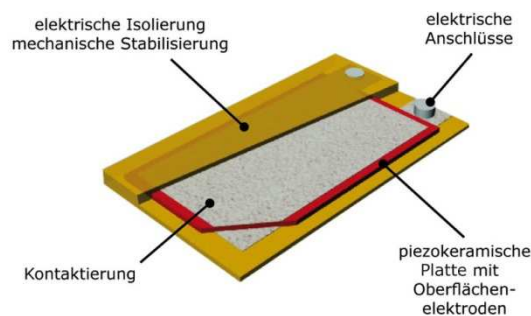


Bild 1: Schematischer Aufbau eines DuraAct Flächenwandlers nach [7]

Mehrschichtige Aufbauten erzeugen Kräfte und Stellwege überwiegend in Dickenrichtung. Verfügen PMA über keine ausreichende mechanische Vorspannung, können aufgrund dynamischer Kräfte Zugspannungen im Material entstehen, die entweder zum Riss der Keramik führen können oder aber zur Delamination, dem Ablösen zwischen Elektrode und Keramik [8, 9]. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Zugfestigkeit von PZT bzw. der geringen Haftfestigkeit des Elektrodenmaterials auf PZT. Bei mehrschichtigen Ultraschallwandlern wird teilweise darauf verzichtet, die einzelnen Elektroden und PZT-Schichten stoffschlüssig zu verbinden. Hier garantiert eine rein mechanische Sicherung den festen Verbund der einzelnen Bauteile. Fällt die mechanische Vorspannkraft ab, z. B. infolge von thermischer Ausdehnung, kann es zum Ablösen der einzelnen

Bauteile voneinander kommen, was im weiteren Verlauf durch Zerrüttung zur Zerstörung des Elements führen kann.

Ein weiterer, bei PMA häufig auftretender Defekt entsteht durch Spannungsspitzen in den Randbereichen der inneren Elektroden. Um Kurzschlüsse sicher auszuschließen, enden die inneren Elektroden eines PMAs mehrere μm vor der gegenüberliegenden äußeren Elektrode (Bild 2a). Dieser Bereich wird folglich nicht homogen vom elektrischen Feld durchflutet und erfährt entsprechend keine oder nur eine verringerte Dehnung. Zwischen elektrisch aktivem (durchflutet) und passivem Material (nicht durchflutet, grau in Bild 2b) entstehen infolgedessen mechanische Spannungen, die ihr Maximum an der innenliegenden Kante der inneren Elektrode erreichen. Überschreiten diese Spannungsmaxima die Zugfestigkeit der Keramik, reißt diese ein (Bild 2c). Durch die spröde Charakteristik der Keramik können die mechanischen Spannungen nicht durch plastische Verformungen abgebaut werden, so dass die gestarteten Risse wachsen.

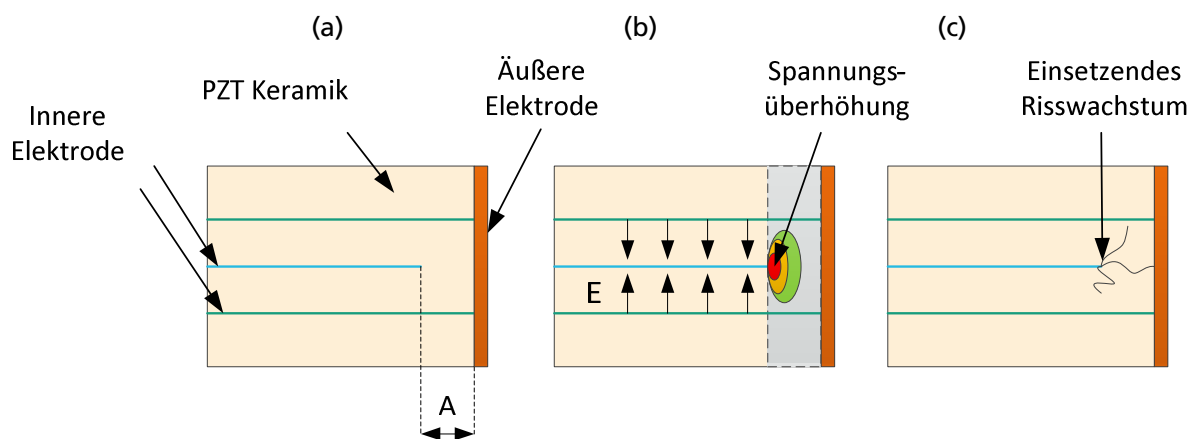


Bild 2: Schematische Darstellung des Mikrorisswachstums. a) Randbereich eines PMAs mit Abstand A, b) durch Einwirken des elektrischen Feldes E kommt es zu Spannungsüberhöhungen am Ende der innenliegenden Elektrode, c) Risswachstum setzt ein.

Winzer entwickelte numerische Modelle von PMA, um Fehler aufgrund kritischer mechanischer Spannungszustände in Abhängigkeit von Fehlstellen und Designparametern untersuchen und daraus Design- und Fertigungsrichtlinien ableiten zu können. Als wesentlicher Fehlermechanismus wird Risswachstum an den Kanten der inneren Elektroden genannt [10].

Van den Ende untersuchte experimentell und numerisch das Zusammenspiel aus mechanischer Belastung und Lebensdauer von PMA und konnte feststellen, dass die Umgebungsfeuchte einen großen Einfluss auf die Lebensdauer hat. So konnte gezeigt werden, dass PMA, die einer erhöhten Feuchte ausgesetzt waren, deutlich mehr Risse aufwiesen als solche, die bei trockener Umgebung betrieben wurden. Als Ursache wird vermutet, dass es zu Wechselwirkungen zwischen Mikrorissen und Feuchte kommt. Als grundlegende Ursache für Mikrorisse werden Unterschiede in den mechanischen Spannungen an den Kanten der Innenelektroden diskutiert. Numerische Simulationen konnten diese Annahme stützen. Weiter wird vermutet, dass sich in den sich so bildenden Hohlräumen Feuchtigkeit ansammeln kann, welche infolge der hohen elektrischen Feldstärken durch

Elektrolyse in ihre Bestandteile zerlegt wird und somit das Risswachstum anfacht. Weiter wird vermutet, dass elementarer Wasserstoff, welcher bei der Elektrolyse frei wird, in die PZT-Struktur eindringt und zusätzlich Degradation hervorruft. Letztlich wird noch erwähnt, dass an den Risspitzen die elektrischen Felder besonders hohe Werte erreichen, welche den aus anderen Quellen bekannten Mechanismus der Elektromigration beschleunigen, so dass letztlich eine Vielzahl von Mechanismen zur elektrischen und mechanischen Degradation von PMA beitragen [4].

Als geeignete Gegenmaßnahmen werden verschiedene Ansätze verfolgt.

Bei der On-Stack-Insulation [11] oder auch Plate-Through-Technik [8] werden entgegen der klassischen Bauweise die einzelnen Keramiksichten vollständig elektrodiert. Die Isolierung gegenüber der entgegengesetzten äußeren Elektrode findet auf der PMA-Oberfläche statt. Durch die vollständige Elektrodierung werden die mechanischen Spannungen in Folge ungleicher Feldverteilung vollständig vermieden. Diesem Vorteil steht der höhere Herstellungs- und damit Kostenaufwand entgegen.

Eine andere Möglichkeit wurde von van den Ende beschrieben [4]. Demnach wird der PMA aus mehreren kleineren PMA mit entsprechend geringer Schichtzahl zusammengesetzt, wobei als Bindemittel ein verhältnismäßig elastischer Klebstoff verwendet wird. Durch die erhöhte Nachgiebigkeit der Klebeschicht werden die mechanischen Spannungen reduziert und das Risswachstum gebremst. Diese Ergebnisse konnten sowohl im Experiment als auch numerisch bestätigt werden. Beim direkten Vergleich verschiedener Klebschichten (Silikon, Epoxidharz) konnte gezeigt werden, dass mit geringerer Steifigkeit der Klebschicht das Risswachstum verhindert werden konnte. Pertsch berichtet ebenfalls, dass durch Segmentierung des PMA, also durch das Einbringen von Klebstoffschichten in Dickenrichtung, die mechanischen Spannungen im Aktor reduziert werden können [12].

Eine andere Möglichkeit der mechanischen Schädigung entsteht durch unzulässig hohe mechanische Spannungen im Material, welche zur mechanischen Depolarisation führen. Für Materialien auf PZT-Basis können bereits Druckspannungen von 50 MPa dazu führen, dass es zum Schalten der Domänen und damit zum Verlust der Polarisierung kommt [23].

2.1.1.2 Elektrische Ermüdung

Ein Fehlermechanismus, der unabhängig von der Bauform auftritt, ist die elektrische Ermüdung des piezoelektrischen Materials. Hierzu gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die die unterschiedlichen Einflussparameter und deren Wirkungen untersucht haben [13, 14, 15, 16, 17]. In der Literatur werden unterschiedliche Modelle für die Ermüdung beschrieben, hier sollen diese nur kurz angesprochen werden. Für eine nähere Betrachtung sei auf weiterführende Literatur verwiesen [18].

Es wird allgemein zwischen Ermüdung im unipolaren und bipolaren Betrieb unterschieden. Beim bipolaren Betrieb wird die Keramik abwechselnd von starken positiven und negativen elektrischen

Feldern durchflutet. Wird die Feldstärke derart gewählt, dass die Koerzitivfeldstärke überschritten wird, kommt es zum Domänenschalten, was als mögliche Ursache für die elektrische Ermüdung betrachtet wird [19]. Es wird angenommen, dass durch die Schaltvorgänge freie Punktdefekte innerhalb des Materials, z. B. Sauerstoff-Leerstellen, entlang des Feldes migrieren können und beim Erreichen von Domänenwänden diese fixieren, so dass weiteres Schalten behindert wird. Aus dieser Überlegung heraus lässt sich die Frequenzabhängigkeit der Ermüdung erklären. So konnte Zhang zeigen, dass bei Überschreiten einer kritischen Frequenz keine weitere Ermüdung mehr festgestellt werden konnte. Eng untersuchte bereits früher die Schalteigenschaften von Domänen in Bariumtitanat (BT) und formulierte den Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke, materialabhängigen Parametern und einer probenabhängigen Schaltzeit [20]. Zhang schlussfolgerte daraus, dass bei Unterschreiten dieser Schaltzeit eine Repolarisierung der Domänen nicht vollständig stattfinden und damit die eigentlichen Degradationsvorgänge nicht ausgelöst würden. [21].

Weiter wurde von Pan die Lebensdauer von auf Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat (PLZT) basierten Aktoren unter zyklischer Beanspruchung untersucht. So wurde zum einen gezeigt, dass Proben mit polierten Oberflächen eine längere Lebensdauer aufwiesen als solche mit verhältnismäßig rauer Oberfläche. Des Weiteren wurde der Einfluss des Elektrodenmaterials sowie das Zr/Sn-Verhältnis der PLZT-Keramik auf die Lebensdauer untersucht. Es wurden drei verschiedene Elektrodenmaterialien (Ag, Au, In) untersucht, jedoch ohne klares Ergebnis. Es wurde festgestellt, dass im Experiment Proben aus Sn-reichem Material eine höhere Lebensdauer aufwiesen als solche, die einen hohen Zr-Gehalt hatten. Als mögliche Ursache wird vermutet, dass ein hoher Sn-Gehalt zu einem leichteren Schalten zwischen anti- und ferroelektrischer Phase führt, was sich positiv auf das Degradationsverhalten auswirkt [13].

Von Sakai wurden mehrere Proben PZT-Materials unter unterschiedlichen thermischen und elektrischen Bedingungen zyklert. Er kam zu dem Schluss, dass eine Abnahme des Faktors K_p , welcher wesentlich für die Leistungsfähigkeit eines Aktors ist, maßgeblich von 90°-Schaltvorgängen der Domänen begleitet wird. Verstärkt wird dieses Phänomen durch sich ausbildende Mikrobrüche, was zu dem Schluss führt, dass mechanisch stabiles Material auch elektrisch stabiler ist [14].

Jiang untersuchte den Zusammenhang zwischen Korngröße und elektrischer Ermüdung in PLZT und stellte fest, dass eine geringe mittlere Korngröße $< 5 \mu m$ zu insgesamt geringerer elektrischer Ermüdung in den Proben führt, im Gegensatz zu Proben mit einer mittleren Korngröße von ca. $10 \mu m$. Als Ursache wird vermutet, dass zwischen großen Körnern häufiger hohe mechanische Spannungen entstehen infolge inkompatibler Verformungszustände, welche ihrerseits zu Mikrobrüchen führen, was wiederum in Übereinstimmung zu Sakai die elektrische Ermüdung vorantreibt [15].

Kumar zeigte, dass verschiedene Kenngrößen wie z. B. Änderungen der elektrischen Kapazität oder eine Verschiebung der Resonanzfrequenz dazu genutzt werden können, den Zustand eines Piezoaktors im Betrieb zu untersuchen und zu bewerten [16].

Als weitere Mechanismen für bipolare Ermüdung kommen mechanische Zerrüttung und Rissbildung in Frage sowie Veränderungen an der Grenzfläche zwischen Elektrode und piezoelektrischem Material, was nachteilige Effekte auf das wirkende elektrische Feld innerhalb des piezoelektrischen Materials nach sich zieht [18].

Beim unipolaren Betrieb kommt es definitionsgemäß nicht zum Domänenschalten. Durch kontinuierliches Anlegen eines elektrischen Feldes kann es jedoch ebenfalls zu einer Migration von Ladungsträgern kommen, welche ihrerseits zu einer Offsetpolarisation führen können. Änderungen der Dehnungs-Hysterese infolge unipolarer Ermüdung, wie sie beispielsweise beim Betrieb von PMA üblich ist, sind in der Regel geringer ausgeprägt und können durch geeignete Maßnahmen, z. B. dem Auslagern bei erhöhter Temperatur, weiter reduziert werden [22], so dass diese Versagensart beim Betrieb von PMA von untergeordneter Bedeutung ist.

Für den Anwender zeigt sich elektrische Ermüdung allgemein in einer Abnahme der maximal erreichbaren Polarisation des Materials, was zu einer Abnahme der erreichbaren Dehnung führt.

2.1.1.3 Thermische Depolarisation

PZT verdankt seine piezoelektrischen Eigenschaften seiner entweder tetragonalen Perowskit- oder rhomboedrischen Kristallstruktur, für die gilt, dass der Ladungsschwerpunkt nicht im geometrischen Zentrum der Einheitszelle liegt. Durch eben diese Ladungsschwerpunktverschiebung kommt es zur spontanen mikroskopischen Polarisation, welche durch ein äußeres elektrisches Feld beeinflusst werden kann. Oberhalb einer für jede Keramik-Komposition individuellen Temperatur kommt es zu einem Phasenwechsel aus den beiden zuvor genannten Phasen in eine kubische Perowskitstruktur, die keine piezoelektrischen Eigenschaften besitzt. Wird ein Aktor oder Sensor aus piezoelektrischem Material über diese *Curie-Temperatur* (T_c) erwärmt, verliert dieser seine Polarisation und damit seine piezoelektrischen Eigenschaften. Ein solcher Vorgang führt folglich zur thermischen Depolarisation.

Während die mechanische Depolarisation dadurch vermieden werden kann, unzulässig hohe mechanische Lasten konstruktiv zu vermeiden, ist die thermische Depolarisation von der Art des Betriebs sowie den Umgebungsbedingungen abhängig.

Abhängig von der Art des elektrischen Anregungssignals können die Verluste im PZT-Material bis zu 30 % ausmachen [4]. Aus dem Produkt des dielektrischen Verlustwinkels $\tan\delta$, welcher abhängig von der Feldstärke 5 bis 16% beträgt [24], der Kapazität des Aktors C_D , dem Quadrat der Amplitude der Arbeitsspannung U_D sowie der Arbeitsfrequenz f_D lässt sich die Verlustleistung P_V abschätzen [24]:

$$P_V \approx \tan\delta \cdot f_D \cdot C_D \cdot U_D^2 \quad (2.1)$$

Bei PMA ist das Verhältnis von Oberfläche zu aktivem Volumen gering im Vergleich zu flächigen Aktoren, was dazu führt, dass die Abwärme des PMAs nur schlecht durch Wärmeleitung und freie

Konvektion abtransportiert werden kann. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn der PMA in einem abgeschlossenen Gehäuse untergebracht ist, welches ihn beispielsweise vor ungünstigen Umwelt- oder Krafteinflüssen schützen soll. Bild 3 zeigt die Oberflächentemperatur eines ungehausten PMA nach 120 Sekunden Testzeit. Dieser PMA wurde gemäß den Spezifikationen mit $U_D = 200\text{ V} \approx 2\text{ kV/mm}$ bei $f_D = 200\text{ Hz}$ (sinus) elektrisch betrieben und konnte sich annähernd frei ausdehnen.

Man erkennt, dass bereits nach kurzer Testzeit die maximale Oberflächentemperatur um über 70 K gegenüber der Umgebungstemperatur angestiegen ist.

Zum Schutz vor möglicher thermischer Depolarisation geben die Hersteller von PMA maximale Einsatztemperaturen vor, welche oftmals im Bereich der halben Curietemperatur und somit typischerweise zwischen 120 °C und 150 °C liegen [25].

Geeignete Maßnahmen gegen Überhitzung können neben einer angepassten elektrischen Anregung auch passive und aktive Kühlmaßnahmen darstellen.

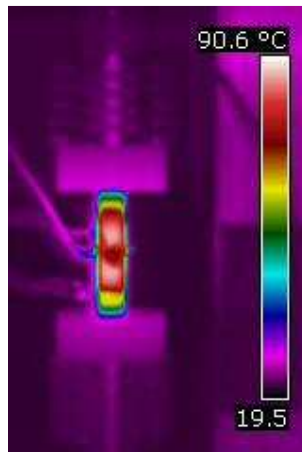


Bild 3: Thermografische Aufnahme eines PMAs im elektrischen Betrieb; deutliche Erwärmung des Aktors (links) bereits nach wenigen Minuten.

2.1.1.4 Leckstromzunahme

Insbesondere PMA, die unipolar betrieben werden, zeigen eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber zunehmenden Leckströmen. Die physikalischen und chemischen Mechanismen sind nach derzeitigem Stand nicht abschließend geklärt, daher sollen im Folgenden einige Arbeiten zu diesem Themengebiet vorgestellt und wesentliche Erkenntnisse dargelegt werden.

Bereits zu Anfang der 1980er Jahre wurden piezokeramische Mehrschicht-Kondensatoren (PMK) großflächig in der Elektrotechnik eingesetzt. Um die Zuverlässigkeit dieser Bauteile in einem zeitlich angemessenen Rahmen nachweisen zu können, wurden erstmals beschleunigte Testverfahren unternommen [26]. Um die Übertragbarkeit der Testergebnisse z. B. aus einem Temperature-Humidity-Bias-Test zu gewährleisten, war es notwendig, die zugrundeliegenden Fehlermechanismen zu erforschen. So untersuchte z. B. Hung den Einfluss von Silberionen-Migration in PMK mit Silber-Elektroden [27]. Er kam zu dem Schluss, dass durch Feuchte, die die Oberfläche des PMKs

penetriert, die Bewegung von Silber-Ionen entlang eines angelegten elektrischen Feldes die Lebensdauer des PMKs drastisch reduzieren kann. Im Experiment konnte nachgewiesen werden, dass durch diesen Mechanismus (Elektromigration) leitende Pfade zwischen zwei benachbarten Elektroden entstehen können, die zu lokalen Kurzschlüssen und damit dem Ausfall des Kondensators führen können.

Waser untersuchte die Degradation des Isolationswiderstandes von *SrTiO*-Keramiken unter verschiedenen äußeren Einflussfaktoren und stellte empirisch qualitative Zusammenhänge auf. So wurde gezeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der charakteristischen Lebensdauer einer Probe und der angelegten elektrischen Feldstärke/Spannung besteht. Als Ursache für die Degradation werden Sauerstoffleerstellen, die sich, angetrieben vom elektrischen Gleichfeld, entlang von Korngrenzen bewegen und an den Elektroden akkumulieren, vermutet [28].

Melnick untersuchte den Einfluss der PZT-Schichtdicke auf die Entwicklung von Leckströmen in PZT-Speichern und kam zu dem Schluss, dass der Degradationsmechanismus, der letztlich zur Zunahme des Leckstroms (I_L) führt, im Bereich des PZT-Elektroden-Interface stattfinden muss und nicht im PZT-Bulk [29].

Chen stellte ähnliche Untersuchungen an und bestätigte den linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der charakteristischen Lebensdauer und der elektrischen Feldstärke, der bereits von Waser aufgezeigt wurde. Es wird erstmals zwischen den Bereichen mit hohem elektrischen Feld ($E > 10 \text{ kV/mm}$) und niedrigem elektrischen Feld ($E < 10 \text{ kV/mm}$) unterschieden [30].

Al Shareef untersuchte ebenfalls Leckströme an PZT-Dünnschichtproben und zeigte, dass sich der Temperatureinfluss auf die Lebensdauer mit einer Arrhenius- oder Exponentialfunktion, der Einfluss der Feldstärke jedoch mit einem Potenzgesetz abbilden lässt, was seiner Meinung nach für Frenkel-Poole-Prozesse spricht. Entgegen Melnick und Chen wird vermutet, dass die Leckströme im Wesentlichen vom Bulk abhängen [31].

Zafar untersuchte die Veränderung des Leckstroms an Barium-Strontium-Titanat-Dünnschichten und formulierte einen Zusammenhang zwischen der Abnahme der Barrierenhöhe und der Zeit in Form einer Exponentialfunktion, die in ihrer Ausprägung einer Weibullfunktion ähnelt. Er stellte weiterhin fest, dass nicht nur der zeitliche Verlauf des Leckstroms von der Temperatur beeinflusst wird, sondern auch der zu erreichende Maximalwert in den von ihm betrachteten Proben mit zunehmender Temperatur steigt [32].

Nagata und Uchino stellen erstmals Versagensmechanismen speziell an PMA in den Vordergrund ihrer Arbeiten. Als Fehlerursachen werden zum einen Delaminationen zwischen benachbarten PZT-Schichten, insbesondere im dynamischen Betrieb, und andererseits Kurzschlüsse in Folge von Ionen- oder Sauerstoffleerstellenmigration im statischen Betrieb genannt [33]. Nagata gelang der Nachweis, dass auch für PMA der lineare Zusammenhang zwischen logarithmierter Lebensdauer

und Temperatur bzw. elektrischer Spannung/Feldstärke gilt [34] Des Weiteren zeigt er in späteren Arbeiten, dass Umgebungsfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer von PMA hat. So erreichten Proben, die einer hohen relativen Luftfeuchte ($r.H. = 80\%$) ausgesetzt waren, im Experiment Lebensdauern, die um zwei bis drei Größenordnungen unter den Lebensdauern von Proben lagen, die bei sehr trockenen Bedingungen ($r.H. = 10\%$) ausgelagert wurden [9].

Andersen betrieb PMA unter verschiedenen elektrischen und klimatischen Bedingungen. In einer Testreihe bei nicht näher spezifiziertem Klima konnte er zeigen, dass die von ihm getesteten Aktoren bei einer dynamischen Belastung von bis zu $E = 6\text{ kV/mm}$, was der doppelten zulässigen Feldstärke entspricht, keine Ausfälle bis 10^8 Zyklen aufweisen. Elektrische Feldstärken von $E = 7\text{ kV/mm}$ und $E = 8\text{ kV/mm}$ hingegen führten zu Ausfallraten von ungefähr 80% . Das Versagen dieser PMA zeigte sich in einem schlagartig abfallenden Isolationswiderstand der PMA, der vermutlich durch elektrische Durchschläge an Schwachstellen der PMA wie z. B. Verunreinigungen, Delaminationen, Risse und Ähnliches verursacht wird. In einem weiteren Test wurden PMA ähnlichen Typs bei $H = 85\% r.H.$ und $T = 85^\circ\text{C}$ statisch mit einer Feldstärke von $E = 3\text{ kV/mm}$ betrieben. Hierbei zeigten sich hohe Ausfallraten von bis zu 89% . Auffallend ist die Tatsache, dass PMA mit runder oder ringförmiger Querschnittsfläche in diesem Test keine Ausfälle zeigten, woraus Andersen schließt, dass die Fehlerursache im Bulk-Material liegt und nicht oberflächlich stattfindet, was im Gegensatz zu [4] steht [35].

Pertsch führte sehr umfangreiche Untersuchungen zur Abnahme des Isolationswiderstandes an PMA unter feuchten Bedingungen durch. Als Ursache für diese Form der Degradation wird Silberdendriten-Wachstum vermutet [36]. Es wird ein Modell vorgeschlagen, bei dem die Lebensdauer eines bestimmten PMA-Typs in Abhängigkeit von der elektrischen Spannung (statisch), der Umgebungstemperatur sowie der wirkenden relativen Feuchte abgeschätzt werden kann. Hierzu werden für jeden der drei genannten Einflüsse Zeitfaktoren abgeschätzt, welche anschließend miteinander multipliziert werden. Die einzelnen Zeitfaktoren sind derart normiert, dass das Produkt aus den drei Zeitfaktoren der Lebensdauer des PMAs in Stunden entspricht. Die Zeitfaktoren wurden an diskreten Stützstellen experimentell ermittelt und zwischen den Stützstellen interpoliert. Der Interpolation des Temperatureinflusses wurde eine Arrhenius-Funktion, der Gleichspannung eine Potenzfunktion und der relativen Feuchte eine Exponentialfunktion zu Grunde gelegt [12].

Stewart betrieb PMAs statisch mit $E = 1,67\text{ kV/mm}$ unter erhöhter Temperatur ($T = 80^\circ\text{C}$) und hoher Feuchte ($H = 80\% r.H.$). Es konnte gezeigt werden, dass Leckströme in den beobachteten Proben kontinuierlich bis zum Kurzschluss zunehmen. Als Ursache wird Elektromigration vermutet, auch wenn keine klaren Belege hierfür im Rahmen der Studie gefunden werden konnten. Weiter wird festgehalten, dass auch bei gesteigerter Leitfähigkeit das Arbeitsvermögen des Aktors nicht nachteilig beeinflusst wird, solange das elektrische Feld aufrechterhalten wird [37].

Eine Gruppe um Weaver und Swingler untersuchten gezielt das zeitliche Verhalten der Leckstromzunahme. So wurde in [39] gezeigt, dass sich der zeitliche Verlauf der Leckstromkurve grob in zwei

Phasen unterteilen lässt. Während der ersten Phase nimmt der Leckstrom nur geringfügig zu. An diese schließt sich eine zweite Phase an, in der nicht nur der Leckstrom selbst stark steigt, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der der Leckstrom zunimmt, zunächst steigt, ehe der Leckstrom sich asymptotisch einem Grenzwert annähert. In einer folgenden Arbeit [40] konnte die Gruppe darüber hinaus zeigen, dass mit zunehmendem Leckstrom auch die zeitlichen Schwankungen eben dessen deutlich zunehmen. Hieraus wird von den Autoren geschlussfolgert, dass es sich bei den Spitzen im Leckstrom um kleinste elektrische Durchschläge handelt, welche nicht dauerhaft zu einem elektrisch leitenden Pfad führen. Infolge eines solchen Mikrodurchschlags entlädt sich der Aktor, welcher elektrisch einem Kondensator entspricht, wodurch der temporäre elektrisch leitende Pfad zusammenbricht. Es wurde ein RC-Modell entwickelt, welches das Laden und Entladen des Aktors im Rahmen der beobachteten mikroskopischen Kurzschlüsse beschreibt. Im Anschluss hieran wurden weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt [41] und gezeigt, dass zur Entwicklung eines zunehmenden Leckstroms eine Schwell-Feldstärke überschritten werden muss. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass nach einer Pause der elektrischen Belastung der Leckstrom bei Wiederinbetriebnahme des Aktors einen geringeren Wert aufweist, als dies vor der Pause der Fall war. Der Leckstrom nähert sich daraufhin in kurzer Zeit wieder dem Wert vor der Pause an und entwickelt sich fortan vergleichbar zum Leckstrom einer Probe, deren elektrische Belastung nicht pausiert wurde. Auch hieraus schlussfolgern die Autoren, dass es im Inneren des Aktors durch Ablagerung metallischen Nickels – die untersuchten Aktoren wiesen Nickelelektroden auf – zu kleinsten leitenden Pfaden kommt. In Nähe der Elektroden sind diese jedoch beweglicher als im Innersten des Rohmaterials, wodurch es nach Abschalten der elektrischen Spannung vermutlich zu einer Resorption und damit Unterbrechung der leitenden Pfade kommt. Bei erneutem Anlegen der elektrischen Spannung können sich in den elektrodennahen Bereichen wieder zügig leitende Pfade bilden, welche an die im Inneren des Rohmaterials anschließen und so in kurzer Zeit wieder das Leckstromniveau vor der Unterbrechung erreichen.

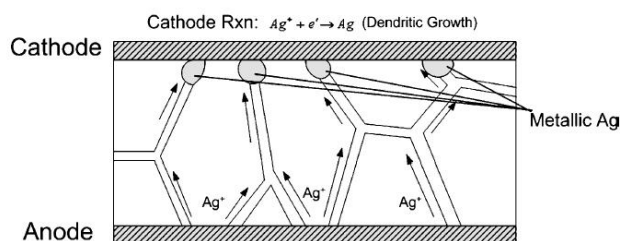


Bild 4: Schematische Darstellung der Elektromigration nach [38]: Eindringende Feuchtigkeit löst Silberionen aus der Anode, welche sich an der Kathode abscheiden und leitende Pfade bilden.

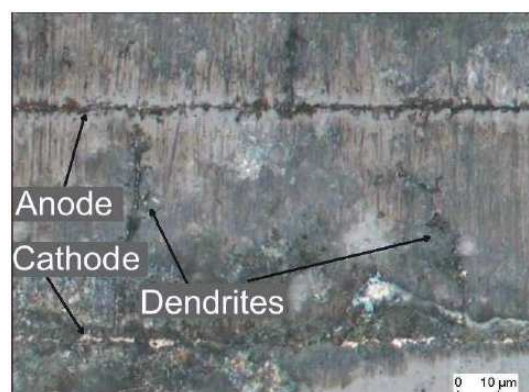


Bild 5: Darstellung der Elektromigration mittels Mikroskopie nach [6]

2.1.1.5 Zwischenfazit

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass zwei Mechanismen vorrangig als Ursache für die Zunahme von Leckströmen in PMA betrachtet werden. Elektromigration in Form von Dendriten-Wachstum (Bild 4 und Bild 5) und Sauerstoffleerstellenmigration, bei der sich Sauerstoffionen entlang von Korngrenzen im elektrischen Feld bewegen. Neben den bereits besprochenen Quellen finden sich Beschreibungen der Effekte und ihre Auswirkungen auf PZT und andere ferroelektrische Werkstoffe z. B. in [42, 43, 44, 45]. In beiden Fällen kann der Zusammenhang zwischen Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit mit Hilfe einer Arrhenius-Gleichung beschrieben werden. Der Einfluss der Umgebungsfeuchte und des elektrischen Feldes lässt sich nach bisherigen Ergebnissen mittels Exponentialfunktion bzw. Potenzfunktion annähern [12].

Eine Unterbrechung der Belastung führt kurzzeitig zu einer Absenkung der messbaren Leckströme, ehe diese wieder auf das Niveau vor der Unterbrechung anwachsen. Es ist also von einer näherungsweise kontinuierlichen Akkumulation von partiellen Schädigungen auszugehen, wie sie ähnlich beispielsweise in der Betriebsfestigkeit betrachtet wird.

Zum Schutz vor den gezeigten Schadensmechanismen haben sich verschiedene Formen der keramischen und metallischen Einhausung des PMAs bewährt, welche jedoch mit erheblichem Aufwand und damit Kosten verbunden sind [46].

Weiter kann die Einhausung zu thermisch bedingten Problemen führen, so dass anwendungsabhängig entschieden werden muss, ob und welche Maßnahme zum Schutz vor Leckströmen ergriffen werden soll. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zur Abschätzung der Lebensdauer von PMA unter feuchten Umgebungsbedingungen.

2.1.2 Beschreibung der Lebensdauer von PMA

He entwickelte ein Lebensdauermodell für piezoelektrische Mikroaktoren. In einer frühen Version wird die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der elektrischen Anregung und Lebensdauer ermittelt [47]. In einer folgenden Version wird das Modell um eine Temperaturkomponente erweitert [48, 49]. Das Modell basiert auf der Kombination der Verteilungsfunktionen von Belastung und Belastbarkeit (Vergl. Kapitel 3.1.2, Stress-Strength-Interference). Es wird angenommen, dass die lebensdauerabhängige Belastbarkeit eines einzelnen Aktors um die durchschnittliche Belastbarkeit des betrachteten Aktortyps log-normal streut. Neben der Belastbarkeit der Aktoren wurden auch die Belastungen statistisch ausgewertet. Für das betrachtete Beispiel eines piezoelektrischen Mikroaktors zum Antrieb eines Festplattenlesekopfes wurde ermittelt, dass die elektrische Belastung, der der Aktor ausgesetzt ist, einer zweiparametrischen Weibullverteilung folgt, während die thermische Belastung normalverteilt um einen Mittelwert von 30 °C liegt. Aus der Kombination der insgesamt vier Verteilungsfunktionen für thermische und elektrische Belastbarkeit sowie thermische und elektrische Belastung konnte in einem nächsten Schritt die Ausfallwahrscheinlichkeit des Aktors in Abhängigkeit seiner Lebensdauer ermittelt werden.

Pertsch [50] entwickelte eine Berechnungsmethode für PMA des Typs PICMA™ unter elektrischer Gleichfeldbelastung. Es wurden in aufwendigen Testreihen, mit Stichprobenumfängen von mehr als 1000 PMA, die Einflussfaktoren relative Feuchte, Temperatur und elektrische Gleichspannung untersucht und für jeden der Einflussfaktoren entsprechende Zeitfaktoren (A_H, A_T und A_U) festgelegt, die den jeweiligen Diagrammen entnommen werden können. Die Lebensdauer kann anschließend abgeschätzt werden zu:

$$MTTF = A_H \cdot A_T \cdot A_U \quad (2.2)$$

Nach persönlicher Rücksprache mit dem Autor lässt sich festhalten, dass die in [12] gezeigten Messwerte großen statistischen Streuungen unterliegen, so dass die so gewonnenen Lebensdauerwerte in erster Linie als Schätzungen zu verstehen sind, die eine Bewertung der Einflüsse ermöglichen und eine Hilfestellung für den Anwender zur Aktorauswahl darstellen. Zur Interpolation der Messwerte wurden für die r. H. eine Exponentialfunktion, für die Temperatur eine Arrhenius-Funktion und für die elektrische Gleichspannung eine Potenzfunktion angenommen.

2.2 Ermittlung der Zuverlässigkeit

Klassische Ansätze zur Bestimmung und Beschreibung der Zuverlässigkeit komplexer Systeme stoßen aufgrund wirtschaftlicher Randbedingungen zunehmend an ihre Grenzen. Diese klassischen, typischerweise auf großen Stichproben und langen experimentellen Versuchsreihen basierenden Ansätze weichen daher zunehmend moderneren, beschleunigten Testverfahren, die den Zeit- und Kostenaufwand durch fortgeschrittene Versuchspläne und Auswertemethoden reduzieren. Im weiteren Verlauf der Arbeit (Kapitel 5.9) wird ein neues Testverfahren für PMA vorgestellt, welches auf den im Folgenden beschriebenen Verfahren aufbaut.

2.2.1 Step Stress Testing

Die Entwicklung von Testverfahren zur Verkürzung von Lebensdauertests wird kontinuierlich vorangetrieben. So werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, bei denen mehrere Umwelteinflüsse zeitgleich und kombiniert angewendet und diese teilweise während eines Tests in ihrer Amplitude variiert werden. Aus der jeweiligen Antwort des Systems oder der Komponente können trotz geringer Stichprobenzahlen Aussagen zur Wirkung einzelner und kombinierte Einflussparameter generiert werden.

Das Step Stress Testing stellt beispielhaft einen Vertreter stark verkürzter Tests dar. Hierbei werden mehrere Proben sukzessiven steigenden Lasten ausgesetzt. Ein grundlegender Überblick mit Beispiel wurde z. B. von Nelson [51] beschrieben, während von Donovan [52] die Auswertung der resultierenden Daten und die Steuerung des Tests in den Vordergrund gestellt wurden. Die Dauern der einzelnen Belastungsstufen werden so gewählt, dass auf jeder Belastungsstufe Ausfälle auftreten, so dass die Verteilungsfunktionen der Ausfälle für jede Belastungsstufe nach herkömmlichen Methoden geschätzt werden kann. Aus dem Vergleich der unterschiedlichen Verteilungsfunktionen kann im Anschluss ermittelt werden, wie groß der Einfluss der untersuchten Parameter

auf die Lebensdauer des untersuchten Elements ist. Durch die steigenden Belastungsstufen wird sichergestellt, dass alle Elemente der betrachteten Stichprobe in kurzer Zeit ausfallen. Gleichzeitig werden die Belastungsparameter in einem weiten Bereich abgeprüft und so mögliche Schwachstellen im Design zügig aufgedeckt, weswegen die Methode häufig in der Entwicklung von neuen Elementen und Systemen angewendet wird.

In Ergänzung zu den von Nelson [51] erwähnten Grenzen der Step Stress Testings ist zu erwähnen, dass die grundlegende Verteilungsfunktion (Weibull, Log-normal etc.) entweder vor dem Tests bekannt sein oder aber der Stichprobenumfang und die Steuerung der Belastungsstufen derart gewählt werden muss, dass auf jeder Stufe eine ausreichend große Anzahl von Ausfällen auftritt, um die Verteilungsfunktion ausreichend genau schätzen zu können. Zwar kann mit Hilfe des gewöhnlichen Step Stress Testings die Testdauer, nicht jedoch der Stichprobenumfang reduziert werden. Statistische Effekte können ebenfalls nur im geringen Rahmen berücksichtigt werden.

2.2.2 Screening-Verfahren

Eine Möglichkeit die Zuverlässigkeit von Produkten nach der Fertigung zu erhöhen besteht darin, fehlerhafte Einheiten noch beim Hersteller auszusortieren und nur fehlerfreie Einheiten auszuliefern. Wie in Kapitel 3.1 dargestellt werden wird, können Systeme durch verschiedene Mechanismen ausfallen. Insbesondere auf Material- oder Herstellungsfehlern beruhende Frühausfälle lassen sich im Rahmen geeigneter Screening-Verfahren provozieren und somit im Feld vermeiden. Hierzu werden die entsprechenden Bauteile häufig für kurze Zeit einer hohen Belastung ausgesetzt, um gezielt die Schwachstellen in latent defekten Bauteilen aufzudecken. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass durch das Screening-Verfahren keine unverhältnismäßig hohe Schädigung der Gutteile erreicht wird.

Ein typischer Vertreter eines solchen Screening-Verfahrens sind Burn-In-Tests von elektronischen Komponenten. Neuere Vertreter dieser Testmethode war zunächst das Environmental Stress Screening [53, 54], auf dessen Basis weitere Methoden entwickelt wurden, die heute häufig unter dem Begriff *Highly Accelerated Stress Screening (HASS)* zusammengefasst werden. Screening-Verfahren sind wie auch die beschleunigten Testverfahren nicht standardisiert. Die Anwendbarkeit und Anpassung der jeweiligen Verfahren muss für jedes System individuell ermittelt werden [55].

Weitere Beispiele für HASS-Tests mit Beispielen finden sich z. B. in [56]. Zur Qualifizierung von Multilayer Ceramic Capacitors wurden beschleunigte Tests in [57] durchgeführt.

2.3 Motivation

Zur weiteren Verbreitung adaptiver Systeme ist die Sicherstellung der zuverlässigen Funktion auch unter extremen oder teilweise unbekannten Umwelteinflüssen unerlässlich. Dem Anwender fällt hier die Aufgabe zu, abhängig von zu erwartenden Belastungen, oftmals kostenintensive Schutzmaßnahmen wie z.B. hermetisch dichte Gehäuse für den oder die PMA vorzusehen, welche

die Kosten für das zu entwickelnde Gesamtsystem steigern. Eine exakte Kenntnis der PMA-Belastbarkeit ist somit ein Schlüssel zu kosteneffizienten adaptronischen Systemen.

Es ist ersichtlich, dass die wirkenden Ausfallmechanismen von Piezoaktoren im elektrischen Gleich- oder Wechselfeld hinreichend untersucht wurden, um das Ausfallverhalten eines PMAs unter solcher Belastung qualitativ zu beschreiben. Die Übertragung der Ergebnisse auf konkrete Produkte und Anwendungen jedoch ist unbefriedigend, da keine allgemeingültigen Methoden oder Berechnungsvorschriften vorliegen, welche es ermöglichen, die Lebensdauer und Zuverlässigkeit eines PMAs in Abhängigkeit von Anwendungsparametern zu bestimmen.

Darüber hinaus wurde der Einfluss einer Kombination aus elektrischem Gleich- und Wechselfeld auf die Zuverlässigkeit von PMA bisher nicht eingehend untersucht. Dieser Belastungsfall stellt in adaptronischen Systemen jedoch die Regel dar (Kapitel 5.2.2). Daher ist das Verständnis der relevanten Ausfallmechanismen und ihrer Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit von PMA unerlässlich zur Erhebung von Zuverlässigkeitsdaten, die für den Anwender im Bereich der Adaptronik relevant und nutzbar sind.

Es zeigt sich aus den bisherigen Untersuchungen, dass das System PMA auf vielfältige Weise ausfallen kann und die einzelnen Fehlermechanismen teilweise gekoppelt auftreten. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit, Untersuchungen zur Zuverlässigkeit am Gesamtsystem durchzuführen. Würde das System auf seine einzelnen Komponenten, z. B. Bulk-Material, Elektrode und Coating, heruntergebrochen und diese unabhängig voneinander untersucht, würden sich andere Fehlerbilder zeigen, als sie in der realen Anwendung auftreten. So sind Untersuchungen auf Komponentenebene zwar unerlässlich, um einzelne Fehlermechanismen zu studieren, erlauben jedoch nur in Ausnahmefällen direkte, quantitative Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit des Systems PMA und sind daher für die Ermittlung anwendungsrelevanter Daten in diesem Fall nicht geeignet.

Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung eines durchgängigen Verfahrens zur Bestimmung der PMA-Lebensdauer in adaptronischen Anwendungen. Der Fokus liegt dabei neben der Charakterisierung der Lebensdauer eines bestimmten Typs PMA in der Entwicklung eines Ablaufplans, welcher es zukünftig erlaubt, die Lebensdauer anderer PMA in adaptronischen Anwendungen zeit- und kosteneffizient zu bestimmen.

Hierzu wird einerseits Fachwissen, verfügbare Informationen zu den auftretenden Ausfallmechanismen und -ursachen, direkt übernommen und nach Verifikation als qualitative Grundlage einer späteren Modellbildung verwendet. Hierdurch kann auf erneute umfangreiche Versuchsreihen zur Bestimmung der qualitativen Zusammenhänge von Belastungsparametern und PMA-Lebensdauer verzichtet werden.

Andererseits werden neue Verfahren zur Datenauswertung und Erhebung entwickelt, welche es ermöglichen, herstellungsbedingte Schwankungen in der Zuverlässigkeit zu quantifizieren und ihren Einfluss auf die Ergebnisse der Messungen zu minimieren.

3 Grundlagen

Im Folgenden werden einige Grundlagen der Systemzuverlässigkeit wie auch der grundlegende Aufbau von PMA erläutert. Diese sind erforderlich für das Verständnis der weiteren Arbeit und dienen der Einführung.

Für eine tiefere Betrachtung der zuverlässigkeitsbezogenen Themen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur [58, 59] verwiesen. Die in dieser Arbeit verwendete Nomenklatur orientiert sich an der im deutschsprachigen Raum üblichen, wie sie z. B. auch in [58] verwendet wird.

3.1 Zuverlässigkeit

Nach einer gängigen Definition gilt:

Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt. [60]

Aus dieser Definition sind gemäß [61] drei wesentliche Aspekte für eine Zuverlässigkeitsanalyse zu entnehmen:

1. Zuverlässigkeit ist eine statistisch zu messende Größe, die unter Anwendung geeigneter Verfahren empirisch ermittelt oder rechnerisch abgeschätzt werden kann.
2. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall oder das Überleben gilt ausschließlich für die betrachtete Zeitspanne.
3. Sowohl die Funktions- als auch die Umgebungsbedingungen sind definitionsgemäß zur Vollständigkeit einer Zuverlässigkeitsangabe erforderlich.

3.1.1 Kenngrößen

Zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Komponenten und Systemen können verschiedene Kenngrößen verwendet werden. Die am häufigsten verwendeten sind die Ausfalldichtefunktion, Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallrate.

3.1.1.1 Ausfalldichtefunktion

Aus empirischen Ausfalldaten kann die empirische Ausfalldichtefunktion $f^*(t)$ gewonnen werden. Hierzu wird die betrachtete Lebensdauer, die Anzahl von Lastwechseln, die zurückgelegte Strecke oder eine vergleichbare Zufallsvariable in m Klassen gleicher Breite unterteilt und die Ausfalldaten von n Stichproben den jeweiligen Klassen zugeordnet. Die grafische Darstellung dieser Werte in Form eines Histogramms ist in Bild 6 für eine Einteilung in fünf Klassen illustriert. Wurde die Testreihe nicht zensiert, sind am Ende der betrachteten Lebensdauer sämtliche Prüflinge ausgefallen. Die empirische Ausfalldichtefunktion setzt sich nun stückweise aus linear interpolierten Teilfunktionen benachbarten Klassen zusammen, so dass diese zwar stetig, nicht aber stetig differenzierbar ist. In Bild 6 ist diese rot dargestellt. Um das Ausfallverhalten der betrachteten Grundgesamtheit stetig differenzierbar zu beschreiben, wird nach der Ausfalldichtefunktion $f(t)$, (engl. Failure

Density Function) gesucht. Da die Anzahl der untersuchten Proben n in der Regel kleiner ist als die Summe aller hergestellten Proben des gleichen Typs, ist eine exakte Beschreibung des Ausfallverhaltens nicht möglich. Unter der Voraussetzung, dass die Größe der Stichprobe ausreichend groß ist, kann aber nach dem schwachen Gesetz der großen Zahlen [62] davon ausgegangen werden, dass sich das Ausfallverhalten der Stichprobe ähnlich dem der Grundgesamtheit verhält, so dass aus der empirischen Ausfalldichtefunktion durch Approximation die Ausfalldichtefunktion der Grundgesamtheit geschätzt werden kann.

Häufig werden zur Approximation Normal-, Exponential-, Weibull- oder Log-Normalverteilungen angewendet. Die Weibull- wie auch die Log-Normalverteilung werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels näher erläutert, da diese im weiteren Verlauf dieser Arbeit relevant sind.

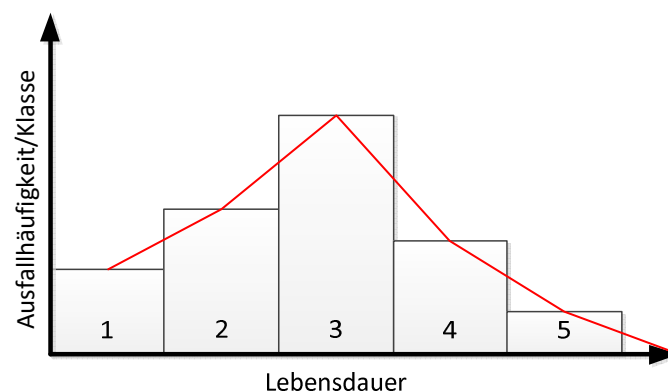


Bild 6: Histogramm und empirische Dichtefunktion $f^*(t)$

3.1.1.2 Ausfallwahrscheinlichkeit und Überlebenswahrscheinlichkeit

Durch Integration der Ausfalldichtefunktion ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$, (engl. Failure Distribution).

$$F(t) = \int f(t)dt \quad (3.1)$$

Diese gibt in Abhängigkeit des Zeitpunktes t die Ausfallwahrscheinlichkeit jedes einzelnen Elements der betrachteten Grundgesamtheit an und dadurch im Umkehrschluss Auskunft darüber, wie viele Einheiten zum betrachteten Zeitpunkt voraussichtlich ausgefallen sein werden.

Das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit ist die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$, engl. (Reliability Function).

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.2)$$

Bild 7 zeigt exemplarisch die zeitlichen Verläufe für $F(t)$ und $R(t)$, die dasselbe Ausfallverhalten beschreiben. Die Ausfallwahrscheinlichkeit (schwarz markiert) startet zunächst bei:

$$F(t=0) = 0 \quad (3.3)$$

und steigt monoton im Laufe der Lebensdauer an. Mit dem Erreichen des Wertes $F(t) = 1$ ist die maximale Lebensdauer erreicht, alle Einheiten sind ausgefallen.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit (rot) beträgt zunächst $R(t=0) = 1$ und fällt anschließend monoton auf 0 beim Erreichen der maximalen Lebensdauer.

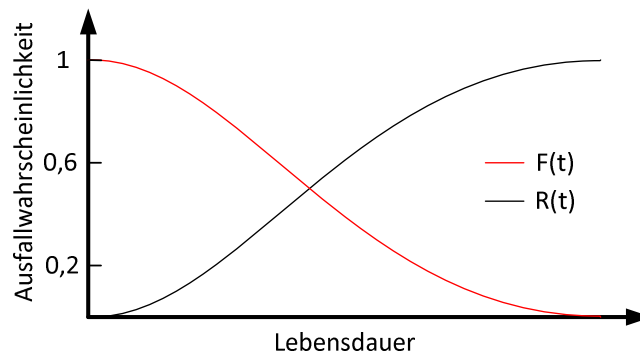


Bild 7: Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ in Rot und Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ im zeitlichen Verlauf

3.1.1.3 Ausfallrate

Eine weitere Kenngröße der Zuverlässigkeitstechnik ist die Ausfallrate $\lambda(t)$. Diese gibt an, wie viele Ausfälle in einem definierten Zeitintervall, bezogen auf die Anzahl der noch intakten Einheiten, zu erwarten sind. Sie ist definiert als:

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (3.4)$$

Für eine Vielzahl technischer Systeme gilt, dass die Ausfallrate mit der Zeit zunächst abnimmt, anschließend für eine bestimmte Zeitspanne näherungsweise konstant ist, ehe sie gegen Ende der zu erwartenden Produktlebensdauer erneut ansteigt. In einer grafischen Darstellung ähnelt dieser Zusammenhang einer Badewanne im Querschnitt. Der daraus resultierende Begriff der Badewannenkurve (engl. Bathtub curve) ist seit den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts fest in der Zuverlässigkeitstechnik verankert und in vielen Standardwerken zu finden [58, 59, 51]. In den vergangenen Jahren hat eine kritische Diskussion über die Plausibilität der Badewannenkurve als solche und der abnehmenden Ausfallrate von Komponenten und Systemen zu Beginn des Produktlebenszyklus im Besonderen begonnen [63, 64, 65].

Bild 8 zeigt den Verlauf einer vereinfachten Badewannenkurve: Man erkennt drei unterschiedlich farblich markierte Bereiche.

1. Bereich abnehmender Ausfallrate (grau). Mögliche Ursachen für sogenannte Frühausfälle sind z. B. Montage- und Designfehler oder auch Missbrauch.
2. Bereich einer näherungsweise konstanten Ausfallrate (blau). Ausfälle, die während dieser Zeitspanne auftreten, werden häufig als Zufallsausfälle bezeichnet, die während des alltäglichen Gebrauchs auftreten und nicht vorhersehbar sind.

3. Gegen Ende der Lebensdauer steigt die Ausfallrate mit zunehmender Zeit stark an (rot). Die jetzt vermehrt auftretenden Ausfälle beruhen häufig auf Verschleiß oder Abnutzung.

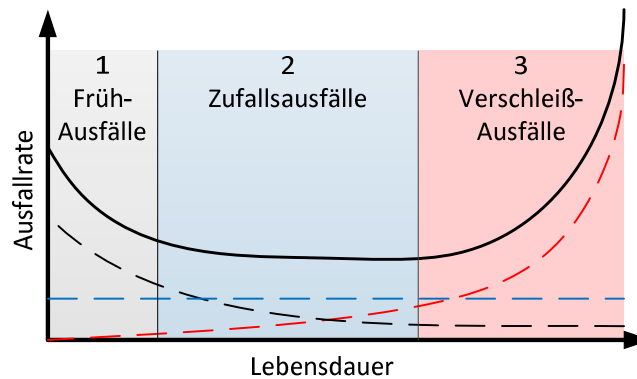


Bild 8: Badewannenkurve

Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass die jeweiligen Ausfallarten nur während des entsprechenden markierten Zeitintervalls auftreten. Tatsächlich kann jedoch jede Fehlerart zu jedem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus auftreten. Das tatsächliche Ausfallverhalten eines Systems oder Elements stellt also keine klare Abfolge von eindeutig unterscheidbaren Versagensarten dar, sondern muss eher als Überlagerung unterschiedlicher Versagensarten aufgefasst werden, wie in Bild 8 durch die gestrichelten Linien dargestellt. Bereits zu Beginn der Lebensdauer kann es zu verschleißbedingten Ausfällen (rot gestrichelte Linie) kommen, und auch gegen Ende der Lebensdauer sind Fehler möglich, die ihre Ursache in einem Mechanismus haben, der eigentlich einem Frühausfall zugerechnet wird (schwarz gestrichelte Linie). Zufallsausfälle sind während der gesamten Lebensdauer möglich und in ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit konstant (blau gestrichelte Linie). Aus der Summe der jeweiligen Ausfallraten ergibt sich so zu jedem Zeitpunkt die Gesamtausfallrate des betrachteten Elements.

Die vereinfachte Annahme hat für die Praxis der technischen Zuverlässigkeit eine hohe Relevanz. Da Frühausfälle sich besonders gravierend auf die Kundenzufriedenheit und in Folge von Garantie- und Gewährleistungsansprüchen auf damit verbundene Kosten auswirken, besteht seitens der Anbieter ein gesteigertes Interesse daran, insbesondere diese Art von Fehlern zu vermeiden oder fehlerhafte Teile auszusortieren, ehe diese den Markt erreichen [65]. Aufgrund der Annahme, dass Frühausfälle in einem frühen Stadium des Produktlebenszyklus von Bauteilen und Systemen auftreten, haben sich in den letzten Jahrzehnten verschiedene Strategien etabliert, diese Frühausfälle noch beim Hersteller gezielt zu provozieren und so die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall während des Gebrauchs beim Nutzer zu reduzieren. Einige dieser Screening-Verfahren wurden in Kapitel 2.2.2 angesprochen.

3.1.2 Zuverlässigkeitstheoretische Ansätze

Neben den zuvor vorgestellten Kenngrößen werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Beschreibung und Untersuchung der Systemzuverlässigkeit verschiedene zuverlässigkeitstheoretische Ansätze verwendet, welche im Folgenden kurz dargestellt werden.

3.1.2.1 Wechselwirkung von Belastung und Widerstandsfähigkeit

Die drei in der Definition der Zuverlässigkeit betonten Aspekte Dauer, Wahrscheinlichkeit und bekannte Umgebungs- und Lastbedingungen resultieren aus der Wechselwirkung von Belastung und Widerstandsfähigkeit (engl. Stress Strength Interference, SSI). Zur statistischen Beschreibung der Zuverlässigkeit ist stets die natürliche Streuung zu berücksichtigen. Diese tritt sowohl für die betrachteten Komponenten und Systeme als auch für die Last- und Umgebungsbedingungen, denen ein Element ausgesetzt ist, auf. Allgemein geht man davon aus, dass *Schäden* oder *Unzuverlässigkeit* immer dann auftreten, wenn die auf das betrachtete Element wirkenden Belastungen höher sind als seine Widerstandsfähigkeit. In Bild 9 ist dieser Zusammenhang illustriert. Sowohl die Belastung (rot) als auch die Widerstandsfähigkeit (schwarz) werden in der Regel als normalverteilt, log-normalverteilt oder einer beliebigen Verteilung folgend und zeitlich variabel angenommen. Durch eine zeitlich bedingte Verschiebung einer der Kurven kommt es zu einer zunehmenden Überlappung. Innerhalb dieses Bereichs gilt: $F(t) > 0$.

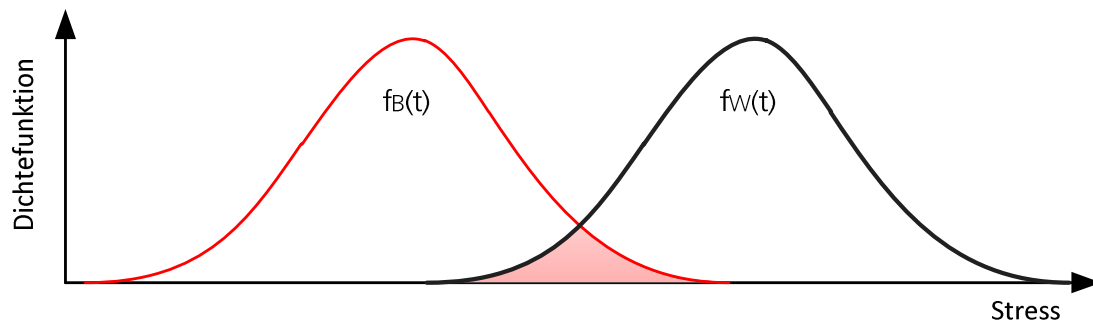


Bild 9: SSI, Wechselwirkung zwischen Belastung (rot) und Widerstandsfähigkeit (schwarz). Im Bereich der Schnittmenge gilt: $F(t) > 0$

Die Ausfalldichtefunktion entspricht hierbei der Schnittmenge beider Kurven.

$$f(t) = f_B(t) \cap f_W(t) \quad (3.5)$$

Sie berechnet sich durch Faltung der jeweiligen Funktionen:

$$f(t) = (f_B(t) * f_W(t)) = \int_0^t f_B(\tau) f_W(t - \tau) d\tau \quad (3.6)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit errechnet sich entsprechend:

$$F(t) = \iint_0^t f_B(\tau) f_W(t - \tau) d\tau dt \quad (3.7)$$

So ergibt sich z. B. bei vollständiger Deckungsgleichheit beider Kurven eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 %. Die Ursache hierfür liegt in der statistischen Unabhängigkeit der jeweiligen Verteilungsfunktionen von Belastung und Widerstandsfähigkeit voneinander. Während in der grafischen Darstellung (Bild 9) die am wenigsten belastbaren Exemplare (linker Rand der Kurve $f_W(t)$) zunächst mit den höchsten Belastungen (rechter Rand der Kurve $f_B(t)$) geschnitten werden, ist in der Realität davon auszugehen, dass auch diese Exemplare mit normal verteilten Belastungen konfrontiert werden, so dass nur ein Teil der von der Schnittmenge erfassten Exemplare tatsächlich ausfällt.

Da sich die Belastbarkeit eines Elementes mit der Lebensdauer in der Regel reduziert – Gründe hierfür sind z. B. Abnutzung und Verschleiß – kommt es auch bei konstanter Belastung erst nach einer bestimmten Betriebsdauer zum Ausfall. Ein Beispiel hierfür wäre eine zyklisch belastete Welle, die mit konstanter Frequenz und Amplitude belastet wird. Bei jedem einzelnen Lastwechsel erfährt diese eine geringfügigen Schädigung, die nicht sofort zum Totalausfall führt. Durch eine Akkumulation dieser Schäden sinkt der tragende Querschnitt der Welle mit zunehmender Zahl der Lastwechsel ab, so dass die Tragfähigkeit der Welle kontinuierlich abnimmt, die Belastbarkeit sinkt. Die reduzierte Belastbarkeit beschleunigt ihrerseits das Risswachstum und führt letztlich zum Totalausfall. Im Falle maschinenbaulicher Produkte wurde in den vergangenen Jahrzehnten umfangreich auf dem Gebiet der Betriebsfestigkeit geforscht. Für viele Standardteile wie z. B. Wellen oder Wälzlager, aber auch komplexere Bauteile steht häufig umfangreiches Wissen, in Form von Zuverlässigkeitsdatenbanken und Berechnungsvorschriften, zur Verfügung. Alle diese Methoden setzen jedoch neben der Kenntnis des betrachteten Systems eine exakte Beschreibung der zu erwartenden Belastungen voraus.

Aus den Formeln (3.5), (3.6) und (3.7) wird ersichtlich, dass zur Bestimmung der Zuverlässigkeit in Abhängigkeit der Belastung die Kenntnis der Verteilungsfunktionen sowohl der Belastungen als auch der Widerstandsfähigkeit notwendig sind.

Modelle zur Beschreibung der Zuverlässigkeit von Elementen setzen sich daher in der Regel aus zwei Bausteinen zusammen. Ein Teil beschreibt die Auswirkung von Einflussfaktoren wie z. B. Temperatur, mechanische oder elektrische Spannung u. Ä. auf das Element und seine Ausfallmechanismen, während der zweite Teil die statistischen Effekte und Ungenauigkeiten in Form von Verteilungsfunktionen beschreibt [51]. Bezogen auf die Illustration in Bild 9 gibt also der erste Teil die Lage der beiden Verteilungsfunktionen in Abhängigkeit der Zeit zueinander an, während der zweite Teil die Form und Breite der einzelnen Verteilungsfunktionen beschreibt. Aus der Summe dieser Informationen kann im Anschluss die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Zeitpunktes sowie etwaiger Einflussparameter bestimmt werden.

3.1.2.2 Roller-Coaster-Curve

Die in Bild 9 dargestellte Belastbarkeit stellt in der Regel die Belastbarkeit gegenüber einem einzigen Ausfallmechanismus dar. Häufig ist diese Beschreibung ausreichend, da für viele Systeme

einzelne Fehlermechanismen dominant sind, so dass eine Betrachtung andere Fehlermechanismen für dieses System unter den gegebenen Bedingungen nicht erforderlich ist. Im Falle mehrerer konkurrierender oder im zeitlichen Verlauf wechselnder Ausfallmechanismen kann es jedoch sinnvoll sein, diese kombiniert zu betrachten. Ein Beispiel hierfür sind die bereits erwähnten Frühausfälle. Diese treten z. B. in Folge von Fabrikationsfehlern oder unsachgemäßer Handhabung auf. Der hieraus resultierende Fehlermechanismus ist in der Regel nicht identisch mit dem für die betrachtete Komponente dominanten Ausfallmechanismus. Es treten also mindestens zwei unterschiedliche Fehlermechanismen auf, die in der Regel zeitlich getrennt vorkommen. Die Darstellung der Belastbarkeit einer solchen Komponente folgt dann einer Kombination von mindestens zwei Verteilungsfunktionen (z. B. Normalverteilung). Die entsprechende Darstellung der Ausfallrate (engl. *Failure Rate* oder *Hazard Rate*) über die Zeit (Bild 10) kann darüber hinaus im Bereich der Frühausfälle mehrere lokale Maxima erreichen. In der Literatur wird in diesem Fall häufig von der *Roller-Coaster-Curve* gesprochen [66, 67]. Nach einer bestimmten Betriebsdauer sind die meisten Frühausfälle bereits eingetreten, so dass die Darstellung der Belastbarkeit der verbleibenden Bauteile oder Komponenten im weiteren Verlauf wieder einer einfachen Verteilungsfunktion entspricht.

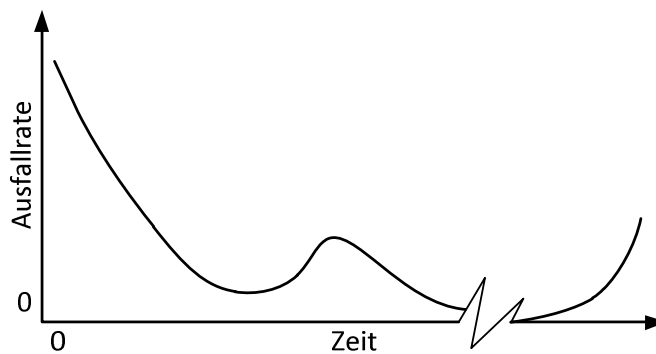


Bild 10: Roller-Coaster-Curve nach Wong [67]; zeitlich getrennt auftretende Ausfallmechanismen äußern sich durch einen unstetigen Verlauf der Ausfallrate über die Zeit.

3.1.2.3 Weibullverteilung

Zur Auswertung von Ausfalldaten eignet sich die Weibullanalyse. Mit dieser Methode ist es möglich sehr unterschiedliche Ausfallcharakteristiken in Form einer Weibullverteilung zu beschreiben. Zur einfachen Visualisierung der Ergebnisse, kann die Verteilung auf Weibullpapier grafisch dargestellt werden.

Das vereinfachte Vorgehen der Weibullanalyse besteht darin, zunächst die vorhandenen Lebensdauerdaten zu ordnen und ihnen anschließend Rangzahlen zuzuweisen, die mit der erwarteten Ausfallwahrscheinlichkeit korrelieren. Letztlich wird die postulierte Ausfallwahrscheinlichkeit über der Lebensdauer der einzelnen Proben aufgetragen und eine Regressionskurve (3-parametrig) oder Regressionsgerade (2-parametrig) ermittelt. Anhand der sich so ergebenden Kurve bzw. Geraden können anschließend charakteristische Werte wie der Formparameter B , die charakteristische Lebensdauer T^* oder eine ausfallfreie Zeit t_0 bestimmt werden. Ferner kann jeder Lebensdauer eine Ausfallwahrscheinlichkeit zugeordnet oder die Lebensdauer bei einer geforderten Überlebenswahrscheinlichkeit bestimmt werden.

Es wird unterschieden zwischen der 2-parametrischen Weibullverteilung, für die die Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des betrachteten Zeitpunktes t definiert ist als:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T^*}\right)^B} \quad (3.8)$$

und der 3-parametrischen Weibullverteilung, die zusätzlich zum Formparameter B (in einigen Quellen auch β) und der charakteristischen Lebensdauer T^* durch die ausfallfreie Zeit t_0 charakterisiert wird. Es ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der 3-parametrischen Weibull-Verteilung:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T^*-t_0}\right)^B} \quad (3.9)$$

Abhängig vom Formparameter B nimmt die Weibullverteilung sehr unterschiedliche Formen an, so kann z. B. mit einem Formparameter von 3,5 eine Gauß'sche Normalverteilung angenähert, mit einem Formparameter von $B = 1$ eine Exponentialverteilung beschrieben werden.

Beträgt der Wert des Formparameters weniger als eins, nimmt der Funktionswert der Weibullverteilung monoton ab, übertragen auf die Zuverlässigkeit lässt sich auf diese Weise eine abnehmende Ausfallrate beschreiben, wie sie im ersten Bereich des Produktlebenszyklus häufig auftritt (vergl. Badewannenkurve). Bei Werten $B > 1$ steigt die Weibullverteilung stetig an, womit eine zunehmende Ausfallrate beschrieben werden kann, wie sie im Falle von Verschleißausfällen in der dritten Phase des Produktlebenszyklus üblich ist. Der mittlere Bereich des Produktlebenszyklus, der von zufälligen Ausfällen dominiert und daher mit einer konstanten Ausfallrate beschrieben wird, kann mit $B = 1$ abgebildet werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Zuordnung ausschließlich für die 2-parametrische Weibullverteilung gilt. Durch Berücksichtigen einer evtl. vorliegenden ausfallfreien Zeit kommt es zu einer Verschiebung in der grafischen Darstellung der Verteilung im Weibullpapier, die mit einer Krümmung der Weibullkurve einhergeht. Hierdurch wird die Steigung der Weibullverteilung definitionsgemäß kleiner, was sich sowohl grafisch als auch rechnerisch in niedrigeren B -Werten niederschlägt.

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass eine ausfallfreie Zeit t_0 der Grundannahme einer abnehmenden Ausfallrate zu Beginn der Produktlebensdauer widerspricht. Dieser Umstand ist einer der Gründe für die bereits vorher angesprochenen Diskussionen zur Plausibilität der Badewannenkurve als solche. Insbesondere mechanische Systeme fallen bei angemessener Belastung überwiegend in Folge von Verschleiß- und Abnutzungserscheinungen aus, was sich in ausfallfreien Zeiten widerspiegelt, die einen wesentlichen Teil der Produktlebensdauer betragen können und entsprechend Weibull-Formparameter von $B > 1$ über die gesamte Produktlebensdauer aufweisen.

Weiter gilt, dass die maximale Lebensdauer nicht in direktem Zusammenhang zur charakteristischen Lebensdauer T^* steht. Während die maximale Lebensdauer die tatsächliche Lebensdauer der

am längsten überlebenden Einheit beschreibt, stellt die charakteristische Lebensdauer eine mathematisch definierte Kenngröße dar, die zur Beschreibung der Verteilungsfunktion verwendet wird. Die Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt der charakteristischen Lebensdauer ergibt sich für Weibullverteilungen rechnerisch gemäß Formel 3.8 zu: $F(t=T^*) = 1 - e^{-1} = 63,2\%$.

Neben der Beschreibung der Ausfallcharakteristik können mit Hilfe der Weibullverteilung auch statistische Maßzahlen definiert werden. Abhängig von der Anzahl der vorhandenen Messwerte kann z. B. ein Vertrauensbereich definiert werden. Die entsprechenden Vertrauensgrenzen markieren die oberen und unteren Grenzen der Weibullverteilung mit der geforderten Aussagewahrscheinlichkeit.

Liegen Datensätze für unterschiedliche Stichproben vor, z. B. unterschiedliche Produktionschargen derselben Baureihe, kann mit Hilfe der Weibullanalyse überprüft werden, ob diese unterschiedlichen Stichproben Teil einer gemeinsamen Grundgesamtheit sind, also die einzelnen Elemente unabhängig von der jeweiligen Charge die gleiche Qualität aufweisen. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass der Formparameter der Weibullverteilung für jeden Ausfallmechanismus eines Bauteils oder Systems charakteristisch ist, so dass ein übereinstimmender Formparameter auch eine Übereinstimmung des Ausfallmechanismus bedingt. Sind ferner die charakteristischen Lebensdauern T^* der betrachteten Stichproben gleich, kann davon ausgegangen werden, dass es aus Zuverlässigkeitssicht keine Unterschiede zwischen den Stichproben gibt, sie folglich der gleichen Grundgesamtheit entstammen.

Werden unterschiedliche Stichproben einer Baureihe unterschiedlich stark beansprucht, führt dies erwartungsgemäß zu unterschiedlichen Lebensdauern. Bleibt jedoch der Ausfallmechanismus gleich, muss nach gängiger Meinung auch der Formparameter B konstant bleiben, da dieser wesentlich durch den vorherrschenden Ausfallmechanismus dominiert wird [61]. Die jeweiligen Weibullverteilungen verlaufen in der grafischen Darstellung parallel zueinander. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das charakteristische Ausfallverhalten qualitativ gleichbleibt, auch wenn es in den erzielten Lebensdauern deutliche Unterschiede gibt. Diesen Zusammenhang macht man sich z. B. bei beschleunigten Test- und Auswerteverfahren wie dem *Sudden Death Test* zu Nutze [61].

3.1.2.4 Log-Normalverteilung

Sind die Logarithmen der ermittelten Lebensdauern einer Stichprobe normal-verteilt bietet sich mit der Log-Normalverteilung eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Verteilungsfunktion der Stichprobe. Die Ausfallrate der Log-Normalverteilung steigt zunächst an, ehe sie nach dem Überschreiten eines Maximums wieder abfällt und sich asymptotisch null annähert. Hierdurch eignet sich diese Verteilung im Vergleich zur Weibullverteilung weniger gut zur Beschreibung von klassischen Ermüdungs- und Verschleißausfällen, jedoch sehr gut zur Beschreibung von beispielsweise elektronischen Systemen [51], bei denen die Ausfallrate zunächst sehr schnell ansteigt (Früh-ausfälle, Missbrauch), jedoch auch eine Vielzahl von Einheiten sehr robust und damit langlebig

sind. Ein Vorteil gegenüber der Weibullverteilung liegt in der Tatsache, dass sich die Methoden der Normalverteilung, welche die am besten untersuchte Verteilung darstellt, sehr leicht auf die Log-Normalverteilung übertragen lassen [58]. Ähnlich zur Weibullverteilung besteht auch bei der Log-Normalverteilung die Möglichkeit der grafischen Darstellung in einem speziellen Wahrscheinlichkeitspapier. Hierbei ist die Abszisse logarithmisch geteilt, während die Ordinate nach der Normalverteilung geteilt ist. Die Bestimmung der Verteilungsparameter und weiterer Kenngrößen wie z. B. der Vertrauensbereiche erfolgt hierbei analog zum Vorgehen bei der Weibullverteilung.

Eine dreiparametrische Variante zur Beschreibung einer ausfallfreien Zeit t_0 besteht grundsätzlich, spielt in der Praxis jedoch eine untergeordnete Rolle [58]

3.1.3 Beschleunigte Testverfahren

Die Ausfallrate moderner elektronischer Bauteile liegt in der Größenordnung: $\lambda = 10^{-10}h$ [55]. Auch mechanische Komponenten erreichen teilweise Lebensdauern von vielen tausend Stunden im regulären Betrieb. Zum Nachweis solch langer Lebensdauern und kleiner Ausfallraten sind daher Strategien erforderlich, die den experimentellen Aufwand zeitlich begrenzen.

Hierfür wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Ansätze entwickelt, die häufig auf einer Steigerung der Belastung durch Variation der Last- oder Umweltparameter basieren. Entsprechende Tests werden häufig als *highly accelerated life tests (HALT)* zusammengefasst, wobei keine allgemeingültige und exakte Regelung oder Norm besteht, wie ein solcher Tests durchzuführen ist. Wichtig ist jedoch in allen Fällen, dass durch die veränderten Randbedingungen der auftretende Ausfallmechanismus verstärkt, jedoch nicht verändert werden darf, da ansonsten eine Übertragbarkeit auf die reale Anwendung nicht mehr möglich ist. Der quantitative Zusammenhang zwischen gesteigerter Belastung und Abnahme der Lebensdauer wird allgemein als Beschleunigungsfaktor (engl.: acceleration factor, A) bezeichnet. Dieser kann entweder in gezielten Experimenten bestimmt werden oder für gängige und gut untersuchte Systeme der Literatur entnommen werden. So werden beispielsweise elektronische Systeme häufig bei erhöhter Temperatur getestet. Der Temperatureinfluss auf die Lebensdauer elektronischer Komponenten kann in vielen Fällen mit der Arrhenius-Gleichung beschrieben werden, welche ebenfalls zur Beschreibung chemischer Reaktionen verwendet wird. Es gilt:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (3.10)$$

Die Reaktionsrate k hängt demnach vom Beschleunigungsfaktor A , der universellen Gaskonstante R , der absoluten Temperatur T und der Aktivierungsenergie E_a ab.

Der Einfluss der Temperatur auf elektronische Elemente wie z. B. integrierte Schaltkreise ist ausführlich untersucht und die Arrhenius-Gleichung als Standard etabliert, so dass sie sich auch in entsprechenden Berechnungsvorschriften und Normen wie z. B. [68, 69, 70] wiederfindet.

3.2 Piezoaktoren

Dieses Unterkapitel behandelt Grundlagen ferroelektrischer Werkstoffe und des Aufbaus von PMA.

3.2.1 Ferroelektrische Werkstoffe

Ende des 19. Jahrhunderts entdeckten die Brüder Curie erstmals den piezoelektrischen Effekt an Turmalinkristallen. In der Technik werden auf diesem Effekt beruhende Sensoren und Aktoren seit den 1940er Jahren verwendet. Das erste weitverbreitete Materialsystem, welches auch heute noch z. B. als Taktgeber oder Schallquelle verwendet wird, ist Quarz, SiO_2 [38]. Neuere Anwendungsgebiete umfassen unter anderem die Ultraschalltechnik, Einspritztechnik im Motorenbau und Feinpositionierung im Nanometerbereich. Diese Anwendungen erfordern eine höhere Leistungsdichte des Materials, als sie günstiges und gesundheitlich unbedenkliches SiO_2 bieten kann. Infolge der EU-Richtlinie „2002/95/EG (RoHS) zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“ ist die Forschung und Industrie daher darum bemüht, die derzeit vorherrschenden Materialsysteme auf Basis von Blei-Zirconat-Titanat (PZT) durch andere, weniger gesundheitsschädliche Systeme zu ersetzen [71].

Vereinfacht lässt sich der piezoelektrische Effekt derart beschreiben, dass infolge von äußeren mechanischen Spannungen auf ein Material an dessen Oberflächen ein der mechanischen Spannung proportionales elektrisches Potential entsteht. Dieser Effekt wird in Sensoren genutzt. Demgegenüber nutzen Aktoren den inversen piezoelektrischen Effekt, welcher eine Formänderung des piezoelektrischen Materials infolge eines extrinsischen elektrischen Potentials beschreibt.

Der Proportionalitätsfaktor zwischen Verzerrung und elektrischem Potential ist material- und richtungsabhängig. Es gilt allgemein der Zusammenhang:

$$S_j = d_{i,j} \times E_i + s_{j,k} \times T_k \quad (3.11)$$

Wobei S die dimensionslose Dehnung des Elementes angibt, E die Stärke des wirkenden elektrischen Feldes in $\frac{V}{m}$ und d den piezoelektrischen Verzerrungskoeffizienten in $\frac{m}{V}$. Die Elastizitätskonstante s liegt in der Einheit $\frac{m^2}{N}$ vor. Die mechanische Spannung T entsprechend in $\frac{N}{m^2}$. Der Index i gibt die Richtung des elektrischen Feldes an, j die Richtung der Verzerrung/Dehnung, k die Richtung der wirkenden mechanischen Spannung.

Bei Sensoren/Aktoren, die nicht auf Schub/Scherung beansprucht werden, wirkt per Definition das elektrische Feld stets in 3-Richtung eines Koordinatensystems, welches durch das piezoelektrische Element gelegt wird. Der Verzerrungskoeffizient bei Verformung in die gleiche Richtung wird folglich als d_{33} -Wert bezeichnet. Insbesondere bei flächigen Wandlern wird häufig die Dehnung quer zur Feldrichtung infolge der Querkontraktion genutzt, der dazugehörige Wert wird als d_{31} bezeichnet. Zwar ist gepoltes PZT anisotrop, dennoch gilt:

$$d_{31} = d_{32} \quad (3.12)$$

Weiter gilt für die Querkontraktionszahlen (ν) für PZT-basierte Systeme:

$$\nu < 0,5 \quad (3.13)$$

Daraus folgt für das Verhältnis von d_{33} zu d_{31} :

$$d_{33} > 2 \cdot d_{31} \quad (3.14)$$

Typische maximale Dehnungen in Feldrichtung für Materialien auf PZT-Basis betragen 1 ‰ bis 2 ‰ bei maximalen Feldstärken zwischen 2 kV/mm bis 3 kV/mm. Man erkennt, dass für große Dehnungen eine hohe Materialdicke erforderlich ist. Um bei diesen, noch ausreichend hohe Feldstärken zu erreichen, wären bei einem einlagigen Aufbau sehr hohe elektrische Spannungen notwendig (Bild 11). Aus Gründen der Nutzbarkeit und Sicherheit werden daher mehrere dünne piezoelektrische Schichten mit Elektroden versehen und anschließend geschichtet. Das Resultat ist ein piezoelektrischer Mehrschicht-Aktor (PMA) wie in Bild 12 dargestellt.

3.2.2 Aufbau von PMA

Bild 11 und Bild 12 zeigen den schematischen Aufbau eines einschichtigen Piezoaktors bzw. eines PMAs. Während beim einschichtigen Aufbau das gesamte PZT-Material von einem Elektrodenpaar elektrisch durchflutet wird, ergeben sich durch die alternierende Konfiguration der inneren Elektroden des PMAs viele Elektrodenpaare, die jeweils eine dünne Schicht PZT durchfluten. Bei üblichen Schichtdicken zwischen 50 µm und 100 µm ergeben sich so maximale Versorgungsspannungen im Bereich von 100 V bis 200 V, um die geforderten Feldstärken von $E = 2 - 3 \text{ kV/mm}$ zu erreichen. Die Herstellung eines solchen PMAs ist ausführlich in [38] beschrieben. Die Zuverlässigkeit von Piezoaktoren im Allgemeinen wurde im Kapitel 2.1 besprochen, wobei auf Eigenheiten der PMA gesondert eingegangen wurde.

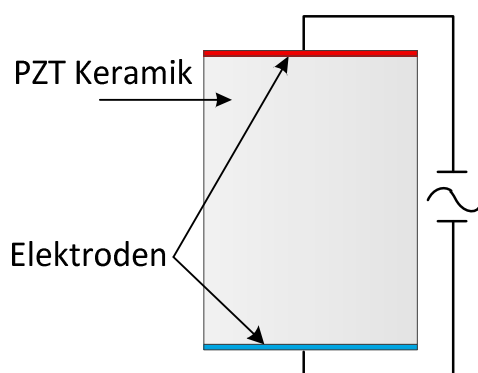


Bild 11: Aufbau eines einschichtigen Piezoaktors: Die gegenüberliegenden Stirnflächen sind mit Elektroden versehen.

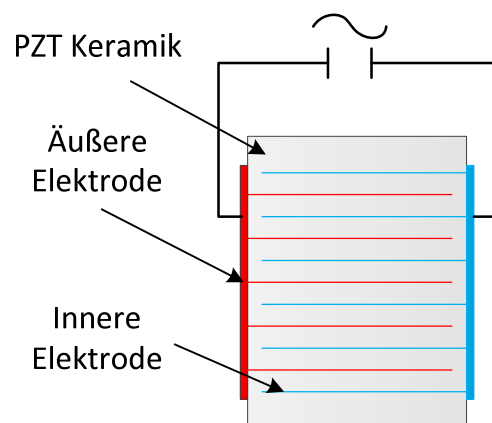


Bild 12: Aufbau eines PMAs: Die Keramik ist von kammartig angeordneten Elektroden durchzogen. Diese sind abwechselnd mit einer der äußeren Elektroden verbunden.

4 Experimentelle Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Messeinrichtungen und Datenerfassung sowie die Proben beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf den Sawyer-Tower-Kreis gelegt, der es ermöglicht, während der elektrischen Zyklisierung die Kapazität, den Isolationswiderstand und den Leckstrom eines Verbrauchers im elektrischen Wechselfeld zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden insgesamt drei solcher Sawyer-Tower-Kreise realisiert, welche im Betrieb an den jeweils zu prüfenden PMA angepasst werden können.

4.1 Messeinrichtungen

4.1.1 Messen im statischen Betrieb

Auftretende Leckströme an PMA werden in der Regel statisch gemessen [12, 35]. Hierzu wird ein bekannter, im Verhältnis zum Widerstand des PMAs geringer ohmscher Widerstand in Reihe zu diesem geschaltet und eine bekannte statische Gleichspannung angelegt. Zeitgleich wird die Spannung, die am Referenzwiderstand anliegt, gemessen. Eine Zunahme dieser Spannung zeugt von einer Zunahme des Leckstroms und damit einer Abnahme des Isolationswiderstandes des PMAs. Bild 13 zeigt schematisch den beschriebenen Messaufbau mit dem PMA, welcher den Isolationswiderstand R_p aufweist, den Messwiderstand bekannter Größe R_m , einer bekannten Gleichspannung U sowie einer gemessenen Spannung am Referenzwiderstand U_m . Der Leckstrom ergibt sich allgemein gemäß dem ohmschen Gesetz zu:

$$I = \frac{U}{R_p + R_m} \quad (4.1)$$

Gleichzeitig gilt:

$$I = \frac{U_m}{R_m} \quad (4.2)$$

Hieraus ergibt sich für den Isolationswiderstand des Piezoaktors:

$$R_p = \left(\frac{U}{U_m} - 1 \right) \cdot R_m \quad (4.3)$$

4.1.2 Messen im dynamischen Betrieb

Ein Piezoaktor lässt sich elektrotechnisch als eine Parallelschaltung von ohmschen Widerstand und Kapazität beschreiben. Dies führt dazu, dass sich im dynamischen Betrieb die Impedanz Z , oder auch Wechselstromwiderstand, des Piezoaktors aus einem ohmschen sowie einem kapazitiven Teil zusammensetzt. Sie berechnet sich allgemein wie folgt:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \omega \cdot C_p} \quad (4.4)$$

Durch den hohen Isolationswiderstand, den Piezoaktoren typischerweise aufweisen (dieser liegt üblicherweise im hohen Megaohmbereich), wird die Impedanz bereits bei geringen Frequenzen ($f < 1 \text{ Hz}$) von ihrem kapazitiven Anteil dominiert. Daher muss bei einer Messung des Isolationswiderstandes / Leckstroms im dynamischen Betrieb der kapazitive Anteil ebenfalls erfasst werden. Eine Möglichkeit zur simultanen Messung von Kapazität und Isolationswiderstand im dynamischen Betrieb bietet der Sawyer-Tower-Kreis. Im Folgenden sollen die wesentlichen und für diese Arbeit relevanten Grundlagen kurz dargelegt werden. Für eine weitergehende Betrachtung wird [72] empfohlen.

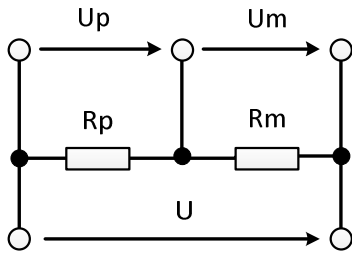


Bild 13: Messaufbau zur Messung des Leckstroms an einem PMA im elektrischen Gleichfeld.

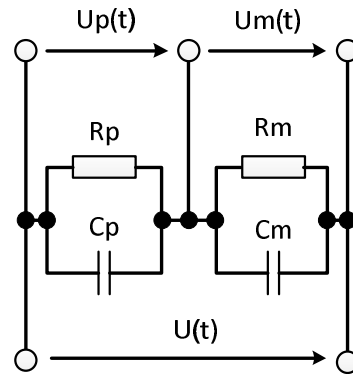


Bild 14: Sawyer-Tower-Kreis zur Messung von Isolationswiderstand und Kapazität einer Impedanz im elektrischen Wechselfeld.

Ein Sawyer-Tower-Messkreis besteht aus einer Referenzimpedanz, mit bekannter Kapazität C_m und Isolationswiderstand R_m , in Reihe zur Impedanz des Piezoaktors, wie in Bild 14 dargestellt. Unter Berücksichtigung einiger Bedingungen ergeben sich gemäß [72] der Isolationswiderstand und die Kapazität des Piezoaktors zu:

$$R_p = R_m \left(\frac{U_0}{U_{m0}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

$$C_p = C_m \frac{U_{m \max} - U_{m \min}}{(U_{\max} - U_{\min}) - (U_{m \max} - U_{m \min})} \quad (4.6)$$

wobei U_0 der arithmetische Mittelwert der periodischen Spannung $U(t)$ ist und U_{m0} der arithmetische Mittelwert der Messspannung $U_{m(t)}$, U_{\max} , U_{\min} , $U_{m \max}$ und $U_{m \min}$ geben die jeweiligen Maximal- bzw. Minimalwerte der Wechselspannung $U(t)$ bzw. der Messspannung $U_{m(t)}$ innerhalb einer Periode an.

Für die Dimensionierung der Referenzimpedanz gibt es einige Richtlinien, welche hier kurz beschrieben werden. Für weitergehende Informationen sei erneut auf [72] verwiesen.

Die Kapazität der Referenzimpedanz C_m sollte im Vergleich zur Kapazität des Piezoaktors C_p sehr groß sein, um den Anteil U_m an der Gesamtspannung U gering zu halten. Der Isolationswiderstand der Referenzimpedanz R_p wiederum sollte im Vergleich zu R_p klein sein, um eine ausreichend hohe

Auflösung der Messung zu gewährleisten. Es ist weiter zu beachten, dass der Gleichanteil der Messspannung U_{m0} bei Anlegen einer Wechselspannung an den Sawyer-Tower-Messkreis ein PT_1 -Verhalten zeigt. Die Einschwingdauer T_E des Messaufbaus lässt sich gemäß Formel 4.7 abschätzen.

$$T_E \approx 5 \cdot C_m R_m \quad (4.7)$$

Auslegung der Sawyer-Tower-Kreise für diese Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Auslegung des Sawyer-Tower-Kreises durch numerische Analysen in Matlab Simulink (Toolbox: Simscape) unterstützt. Hierzu wurde ein numerisches Modell des gesamten Messaufbaus erstellt und verschiedene Referenzimpedanzen sowie Degradationsstadien des Piezoaktors simuliert. Die Ergebnisse der Simulationen für die Ceramtec PMA sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Als Referenzimpedanz lieferte die Kombination $R_m = 1 \text{ k}\Omega$ und $C_m = 1 \text{ mF}$ vielversprechende Ergebnisse.

Tabelle 1: Auslegung der Sawyer-Tower-Kreise: Ergebnisse der numerischen Simulationen für verschiedene Werte von R_p für $C_m = 1 \text{ mF}$, $R_m = 1 \text{ k}\Omega$ bei einer $C_p = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$

R_p	U_{m0}	$U_{m \min}$	$U_{m \max}$
20 MOhm	0	-0,11	0,11
2 MOhm	0,04	-0,07	0,15
200 kOhm	0,37	0,26	0,48
20 kOhm	3,56	3,45	3,67

Da zur Erstellung des Lebensdauermodells an den in Kapitel 4.3 beschriebenen PMA mehrere experimentelle Tests gleichzeitig durchgeführt werden sollen, werden insgesamt drei Sawyer-Tower-Kreise mit den aus der Simulation ermittelten Referenz-Impedanz-Werten erstellt und mit Anschlussmöglichkeiten in Form von BNC-Steckern versehen. Weiterhin wird ein Spannungsteiler aus den Widerständen R_1 und R_2 im Verhältnis 1:38 integriert, der es ermöglicht, die PMA-Spannung, welche im Rahmen der experimentellen Untersuchungen Werte von bis zu $U_p = 150 \text{ V}$ erreicht, mit der vorhandenen Datenerfassung zu verwenden, welche eine Maximale Brückenspannung (U_b) von 10 V erlaubt. Es gilt:

$$U_p = U_b \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.8)$$

Aus Gründen des Arbeitsschutzes werden die Sawyer-Tower-Kreise anschließend in elektrisch isolierende Kunststoffgehäuse verbaut. Im weiteren Verlauf der Arbeiten werden die bestehenden Sawyer-Tower-Kreise um je eine Kapazität und einen Messwiderstand erweitert, um so die Möglichkeit zu schaffen, auch andere PMA zu vermessen. Die einzelnen Messkapazitäten und -widerstände werden zudem jeweils mit einem Mikro-Dip-Schalter versehen, so dass sich im weiteren Gebrauch die einzelnen Bauelemente einfach zu- und abschalten lassen.

In Bild 15 ist der schematische Aufbau der Sawyer-Tower-Kreise zu sehen. Man erkennt die vier BNC-Anschlüsse. Die Kanäle U_m und U_b dienen zum Messen der Messspannung sowie der am PMA

anliegenden Spannung. Der Aktor wird mit dem Kanal *A* verbunden, der Kanal *E* mit dem Leistungsverstärker. Bild 16 zeigt den gesamten Messaufbau schematisch. Zusätzlich zu den drei Messkanälen für die Messungen bei dynamischer Anregung befindet sich rechts ein zusätzlicher Strang zur Messung des Leckstroms eines statisch betriebenen PMA. Die drei bzw. vier PMA befinden sich im Inneren der Klimakammer und sind elektrisch mit den jeweiligen Sawyer-Tower-Kreisen bzw. der Messbox für statische Anregung verbunden (orange). Die Sawyer-Tower-Kreise sind über jeweils zwei Kanäle mit dem NI DAQ-Pad verbunden (hellgrün U_b , dunkelgrün U_m), welches die Daten an den Windows PC mit NI LabVIEW weitergibt. Ein Signalgenerator erzeugt das dynamische Anregungssignal (hellblau), welches von den jeweiligen Kanälen eines Leistungsverstärkers auf die notwendige Amplitude verstärkt wird, ehe es an die Sawyer-Tower-Kreise weitergeleitet wird (dunkelblau).

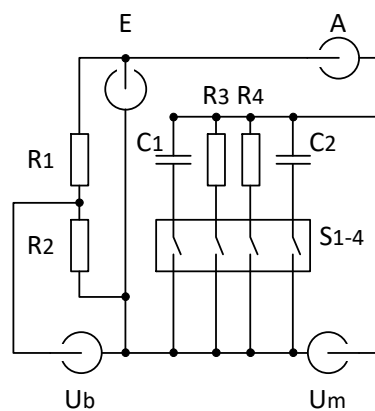


Bild 15: Schematische Darstellung der Sawyer-Tower-Kreise, die in dieser Arbeit realisiert wurden.

4.1.3 Messablauf

Mittels BNC-Kabeln werden die Sawyer-Tower-Kreise mit den jeweiligen Proben innerhalb der Klimakammer verbunden. Die Kabeldurchführung der Klimakammer wird mit Schaumstoff verschlossen, um übermäßigen Austritt von Wasserdampf zu vermeiden. Vor dem Start der jeweiligen Messung werden die PMA für exakt eine Stunde in der Testatmosphäre ausgelagert, ehe sie elektrisch zyklisiert werden. Diese Auslagerung dient dazu, eine Bildung von Kondensat auf der Oberfläche der Aktoren zum Zeitpunkt des Testbeginns zu vermeiden. Vor Beginn der eigentlichen Messung werden zunächst das Messprogramm und anschließend die elektrische Zyklisierung gestartet. Die Datenerfassung erfolgt kontinuierlich bis zum Ende des jeweiligen Tests. Die klimatischen Bedingungen und Details zu den jeweiligen Messungen werden in PMA-eigenen Protokolldateien festgehalten.

4.2 Datenerfassung und Aufzeichnung

Zur Datenerfassung wurde ein National Instruments (NI) DAQ-Pad 6015 in Kombination mit einem handelsüblichen Windows PC genutzt. Das NI DAQ-Pad verfügt über acht differentielle Eingänge mit einem Spannungsbereich von maximal $\pm 10\text{ V}$ bei einer Auflösung von 16 Bit und einer Abtast-rate von 200 kS/s.

Die Datenauswertung und Speicherung erfolgte auf dem Windows PC mit Hilfe von NI LabVIEW® in der Version 2009. Hierzu wurde ein Messprogramm erstellt, welches mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) gesteuert wird. Der Programmablauf lässt sich im dynamischen Betrieb folgendermaßen gliedern:

1. Erfassen der Werte U_b und U_m mit 1 kHz Abtastrate.
2. Ermitteln der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte für U_b und U_m innerhalb der letzten Sekunde.
3. Berechnen der Werte R_p , C_p und I_L basierend auf den Daten aus 2.
4. Sammeln der unter 3. berechneten Werte und Bilden des Mittelwerts für die letzten 30 Sekunden.
5. Speichern der Werte R_p , C_p und I_L in einer aktorspezifischen Datei.

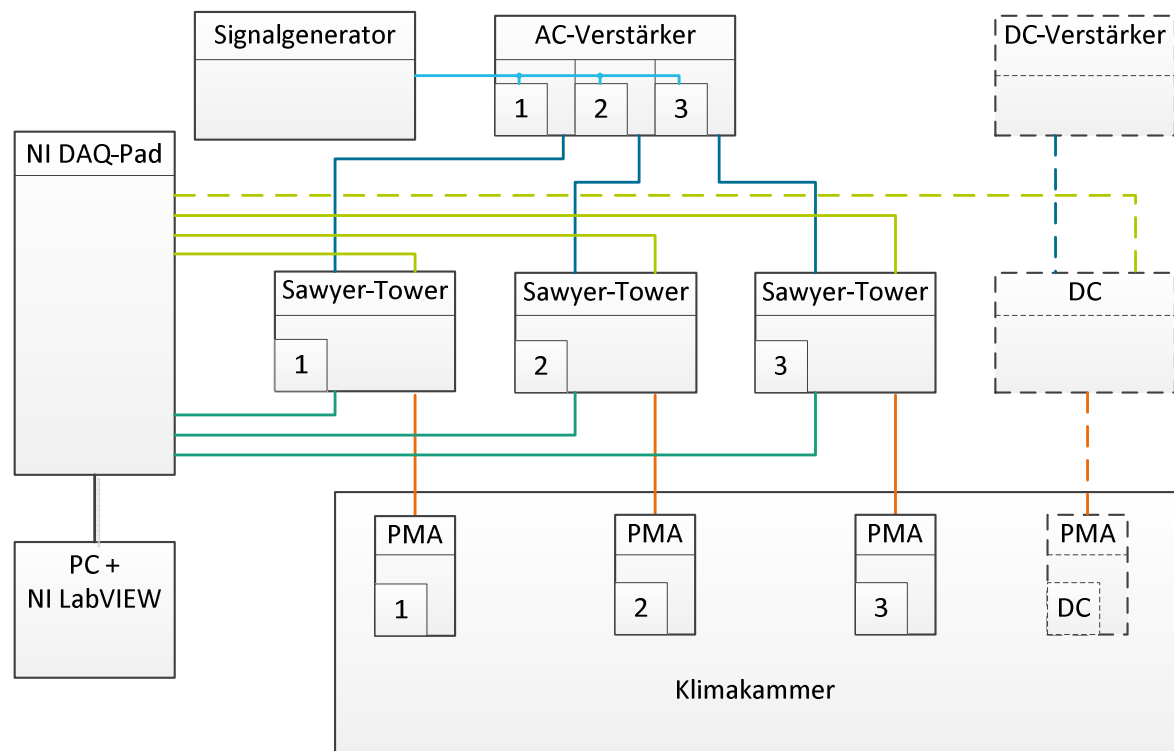


Bild 16: Schematische Darstellung des Messaufbaus; zusätzlich zur Vermessung im dynamischen Betrieb wurden in den Vortests auch statische Messungen durchgeführt (gestrichelt).

Schritt 1: Datenerfassung

Mit Hilfe eines DAQ-Assistenten wird das DAQ-Pad in das Messprogramm eingebunden. Insgesamt können acht Kanäle erfasst werden, von denen sieben vom Programm genutzt werden. Die Kanäle 1-4 des DAQ-Pad erfassen die Spannungen U_m , die Kanäle 6-8 die Spannung U_b .

Das Programm bietet die Möglichkeit, gleichzeitig einen Aktor im statischen sowie drei Aktoren im dynamischen Betrieb zu vermessen. Da wie in Kapitel 3.2 beschrieben im statischen Betrieb lediglich die Spannung parallel zum Messwiderstand gemessen werden muss, um den Leckstrom zu bestimmen, wird im Strang „DC“ die Spannung U_b nicht gemessen.

Schritt 2: Aufbereitung und Visualisierung der Messwerte

Nach der Erfassung der Rohdaten werden die Maximal-, Mittel- und Minimalwerte der Spannung U_b , welche proportional zur am Aktor anliegenden Spannung U_p ist, gemessen und anschließend in Form von numerischen Werten sowohl an die grafische Benutzeroberfläche (GUI) zur Kontrolle durch den Nutzer als auch an die anschließenden Berechnungsroutinen übergeben. Anhand dieser Werte ist der Anwender im laufenden Betrieb in der Lage, die PMA-Spannung zu bewerten und gegebenenfalls Anpassungen an den Leistungsverstärkern vorzunehmen. Für die Berechnung der Leckströme hat dieser Bereich keine weitere Relevanz.

Schritt 3: Berechnung von R_p , C_p und I_L

In separaten Berechnungen werden die Werte R_p , C_p und I_L gemäß [72] aus den im 2. Schritt ermittelten Daten berechnet. Die so berechneten Werte werden zum einen als numerische Werte an die GUI zur optischen Kontrolle durch den Anwender weitergegeben, zum anderen zur Archivierung/Speicherung an den Bereich 4 übergeben.

Schritte 4 und 5: Datenreduktion und -archivierung

Die ermittelten Werte für R_p , C_p und I_L werden anschließend an ein Unterprogramm übergeben. Dieses kann über die GUI unabhängig vom Gesamtprogramm zu- oder abgeschaltet werden und dient dazu, die Werte in eine PMA-spezifische Datei zu schreiben. Innerhalb dieses Unterprogramms läuft kontinuierlich eine Schleife, die in definierten Zeitabständen (30 s) das Unterprogramm zum Schreiben der Daten aktiviert. In der Folge werden im Zeitabstand von jeweils 30 Sekunden kontinuierlich die ermittelten Werte in eine Aktor-individuelle Datei geschrieben. Nach ca. 160 Stunden kontinuierlicher Messung und Datenaufzeichnung wird eine Dateigröße von 10 MB erreicht. Das Unterprogramm ist derart konfiguriert, dass in diesem Falle die weitere Aufzeichnung in einer neuen Datei mit fortlaufendem Index vorgenommen wird. Auf diese Weise wird die maximale Dateigröße auf 10 MB beschränkt, was die Weiterverarbeitung der Daten auch auf leistungsschwachen PC-Systemen ermöglicht.

4.3 Probenbeschreibung

Die experimentellen Untersuchungen werden an PMA vom Typ *Sonox P505* $32,4 \times 7 \times 7 \text{ mm}^3$ von *Ceramtec* durchgeführt (Bild 17).

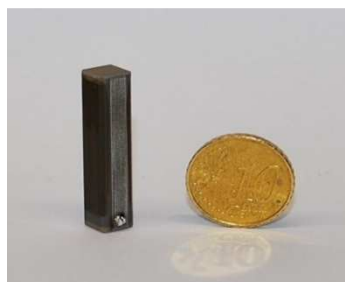


Bild 17: PMA Sonox P505 $32,4 \times 7 \times 7 \text{ mm}^3$

Der grundlegende Aufbau ist vergleichbar mit dem in Bild 12 gezeigten. Die Dicke der aktiven PZT-Schichten beträgt jeweils $100\text{ }\mu\text{m}$, woraus eine maximale Versorgungsspannung von $U_{\text{max}} = 200\text{ V} \sim 2\text{ kV/mm}$ resultiert. Die aktive Länge des Aktors beträgt ca. 27 mm . Die Stirnseiten sind jeweils mit einer ca. 2 mm dicken PZT-Schicht bedeckt, die über keine Elektroddierung verfügen. Die resultierende Gesamtlänge beträgt $32,4\text{ mm}$. Die Querschnittsfläche ist quadratisch mit einer Kantenlänge von 7 mm . Alle Kanten des PMAs wurden mit einer Phase $0,5 \times 45^\circ$ versehen. Die Abmaße sind in Bild 18 schematisch dargestellt. Der dunkle Bereich markiert die aktive Länge. Durch die inneren Elektroden, die an den Seitenflächen des PMAs bis an die Oberfläche geführt sind, wirkt der PMA in diesem Bereich deutlich dunkler als in Bereichen, die ohne innere Elektroden ausgeführt wurden.

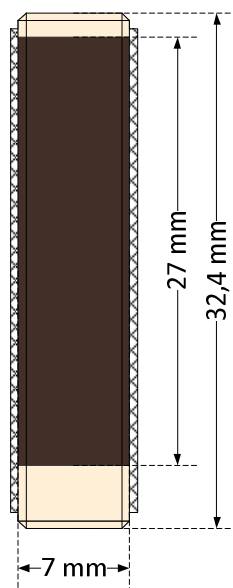


Bild 18: Abmaße des PMAs, aktiver Bereich wirkt optisch durch die inneren Elektroden dunkler, alle Kanten mit einer Phase versehen.

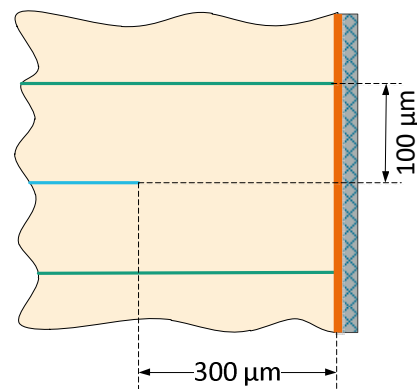


Bild 19: Ausschnitt der PMA-Randschicht. Grün und blau dargestellt die inneren Elektroden, orange die vollflächig aufgetragene Kontaktierungsschicht, grau schraffiert Drahtgewebe

Die äußeren Elektroden bestehen aus zwei unterschiedlichen Schichten. Auf der Innenseite befindet sich eine Kontaktierungsschicht, die die kammartigen inneren Elektroden wechselseitig verbindet und vollflächig auf der entsprechenden Seitenfläche des Aktors aufgebracht wurde. Auf dieser Kontaktierungsschicht ist eine zweite Elektrode aufgebracht. Diese ist aus Drahtgewebe gefertigt und stellt sicher, dass auch im Falle eines makroskopischen Bruches alle Bruchstücke weiter elektrisch miteinander verbunden sind. Die Verbindung zur elektrischen Ansteuerung wird über Kabel realisiert, die mit diesem Drahtgewebe verlötet werden. Bild 19 zeigt den schematischen Aufbau der PMA-Randschicht mit inneren und äußeren Elektroden. Die grün dargestellten inneren Elektroden sind hierbei mit der orangefarbenen Kontaktierungsschicht der äußeren Elektrode verbunden. Die innere Elektrode dazwischen (blau) ist mit der gegenüberliegenden äußeren Elektrode verbunden (nicht im Bild). Gegenüber der orangefarbenen Kontaktierungsschicht weist

diese einen Abstand von ca. $300\text{ }\mu\text{m}$ auf. Der Abstand der inneren Elektroden zueinander beträgt $100\text{ }\mu\text{m}$. Die inneren Elektroden bedecken den PMA-Querschnitt nahezu vollständig. Lediglich gegenüber der entgegengesetzten äußeren Elektrode wird ein Abstand von ca. $300\text{ }\mu\text{m}$ eingehalten. Dies hat zur Folge, dass sowohl die positiven als auch die negativen inneren Elektroden an den PMA-Seitenflächen, die über keine äußeren Elektroden verfügen, frei liegen. Zum Schutz vor elektrischen Überschlüssen, die bei zu erwartenden elektrischen Feldstärken von bis zu $E = 2\text{ kV/mm}$ an der Luft zu erwarten wären, wurden diese Seiten mit Hilfe einer Polymerschicht elektrisch isoliert.

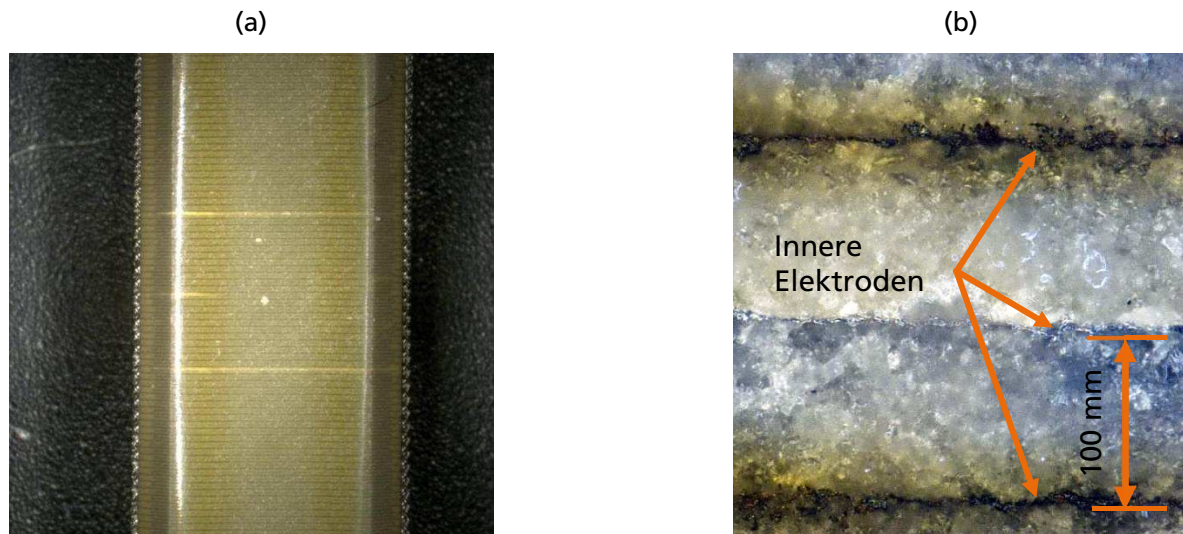


Bild 20: Mikroskopische Aufnahmen eines PMAs;

- a) Nahaufnahme der Seitenfläche des PMAs, innere Elektroden in Ansätzen erkennbar, Drahtgewebe links und rechts deutlich zu erkennen.
- b) 200-fache Vergrößerung: Die inneren Elektroden sind deutlich sichtbar, auffällig ist die unterschiedliche Färbung der Anoden gegenüber den Kathoden.

Bild 20 zeigt zwei vergrößerte Aufsichten auf eine der Seitenflächen des PMAs. Man erkennt den PMA-Aufbau durch die Polymerschicht, die zur elektrischen Isolierung aufgebracht wurde. Hierzu wurde ein Polarisationsfilter verwendet, der ungewollte Reflektionen und Streulicht reduziert. Der Kontrast wurde im rechten Bild anschließend mit Hilfe einer Bildbearbeitungssoftware angehoben, um die Sichtbarkeit von Merkmalen zu verbessern.

5 Ergebnisse und Diskussion der Teilergebnisse

Nachfolgend werden die Entwicklung des Lebensdauermodells und die zugrundeliegende Vorgehensweise zu dessen Ermittlung dargestellt. Das Unterkapitel 5.1 befasst sich mit der entwickelten Vorgehensweise und ihrer groben Gliederung. Es wird dargestellt, welche Ergebnisse vom jeweiligen Arbeitsschritt erwartet werden und mit welcher Strategie dieses Ziel verfolgt wird. Die nachfolgenden Unterkapitel 5.2 bis 5.10 befassen sich mit den einzelnen Arbeitsschritten, welche im Ablaufplan (Bild 21) schematisch dargestellt sind, sowie den entsprechenden Zwischenergebnissen. Das entwickelte Vorgehen führt zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des Lebensdauermodells. Eine frühzeitige Diskussion der jeweiligen Teilergebnisse begünstigt dieses Vorgehen, da hierdurch Anpassungen im weiteren Verlauf des Ablaufplans, z.B. im Rahmen der Versuchsplanung, begründet werden können. Aus diesem Grund werden bereits in den folgenden Unterkapiteln die jeweiligen Zwischenergebnisse diskutiert und kritisch hinterfragt, ehe im 6. Kapitel das globale Vorgehen und Ergebnisse diskutiert werden.

5.1 Entwicklung eines Ablaufplans

Die Bestimmung von Zuverlässigkeitsdaten erfolgt in der Regel durch die Auswertung experimenteller Daten. Das angestrebte Ergebnis ist in diesem Fall eine „Black Box“, die als Eingangsparameter z. B. Belastungsdaten erhält und als Ergebnis eine mittlere zu erwartende Lebensdauer ausgibt. Mit steigenden Anforderungen an die Aussagewahrscheinlichkeit des Ergebnisses nimmt der Umfang des Versuchsplans überproportional zu. Eine genaue Kenntnis der Mechanismen im Inneren der betrachteten Komponente ist hingegen nicht erforderlich. Eine Übertragung der Ergebnisse auf ähnliche Systeme oder Anwendungen ist nur eingeschränkt, oftmals gar nicht möglich, weil der Grad der „Ähnlichkeit“ durch das fehlende Verständnis der wirkenden Mechanismen nicht bestimmt werden kann.

Demgegenüber steht der Ansatz, ein System oder eine Komponente virtuell in kleinere Subkomponenten zu zerlegen, an diesen die eigentlichen Fehlermechanismen auf physikalischer Ebene zu studieren und anschließend die Subkomponenten mit ihren individuellen Zuverlässigkeitsdaten zu rekombinieren. Ein solches „White-Box“-Modell, eine vereinfachende Darstellung der Realität, erfordert in der Regel keine umfangreiche statistische Absicherung, jedoch ein exaktes Verständnis der wirkenden Fehlermechanismen, welches nur durch direkte Beobachtung zu erlangen ist.

Im Falle der PMA ist ein Zerlegen des Gesamtsystems in kleinere Einheiten und ein isoliertes Betrachten einzelner Fehlermechanismen, insbesondere die Entwicklung der Sauerstoffleerstellen- oder Elektromigration, im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend, da zum einen an vereinfachten standardisierten Probekörpern der relevante Fehlermechanismus typischerweise nur eingeschränkt auftritt und zum anderen das Fortschreiten der Degradation nur indirekt gemessen werden kann. Eine abschließende Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Fehlermechanismus ist nicht möglich.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein „Grey-Box“-Ansatz verfolgt, der auf den vorangegangenen Arbeiten (Kapitel 2.1) zu den Ausfallmechanismen aufbaut. Durch eine erste experimentelle Versuchsreihe geringen Umfanges werden die dominanten Einflussfaktoren bestimmt und die entsprechenden Fehlermechanismen sowie deren Verlauf durch Fachwissen identifiziert. Aufbauend auf den bekannten und identifizierten Ausfallmechanismen wird ein erstes, rein qualitatives Modell erstellt, welches die Zusammenhänge aus Belastungsparameter und PMA-Lebensdauer grundlegend beschreibt. Eine erneute Durchführung von Experimenten zur Charakterisierung der Einflüsse verschiedener Belastungsparameter und ihrer statistischen Absicherung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich. Es wird gezeigt werden, dass die bisherigen Arbeiten zu den PoF von PMA eine qualitative Beschreibung des Ausfallverhaltens erlauben.

Die anschließenden Versuchsreihen dienen der Bestimmung quantitativer Zuverlässigkeitskennzahlen und der Verifikation des weiterentwickelten Lebensdauermodells, was auf Basis der bisher verfügbaren Daten aus der Literatur nicht generell möglich ist. Die Ergebnisse der einzelnen Schritte werden jeweils mit den verfügbaren Quellen abgeglichen und auf Plausibilität geprüft.

Aufbauend auf dem in [73] gezeigten Vorgehen zur Entwicklung eines Lebensdauermodells für PMA wurde der nachfolgende 9-stufigen Ablaufplan entwickelt, welcher in Bild 21 dargestellt ist.

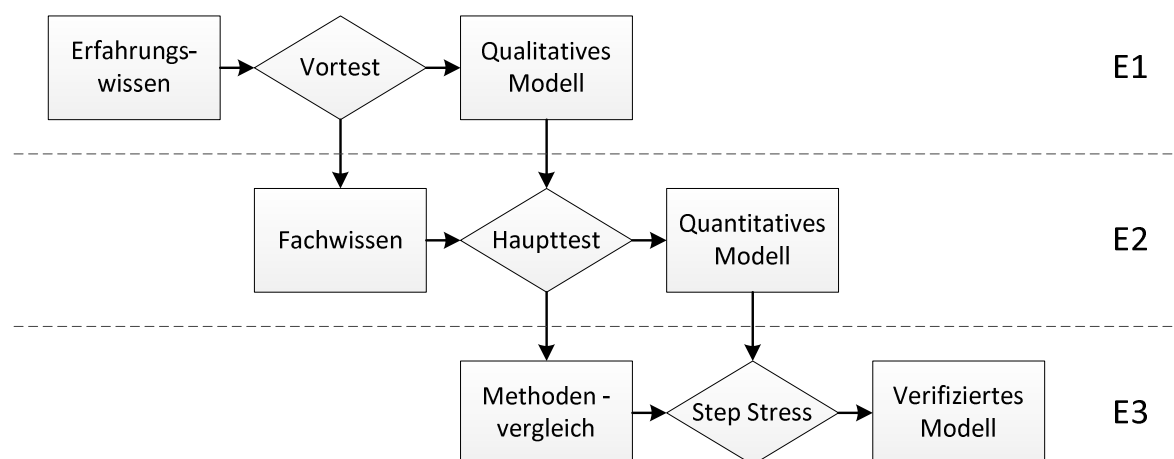


Bild 21: Ablaufplan für die Erstellung des Lebensdauermodells für PMA

Dieser kann weiter in drei Ebenen (E1 – E3) unterteilt werden:

Die qualitative Ebene (E1) umfasst die Definition der Aufgabenstellung aufgrund von bekannten Zusammenhängen und subjektiven Erfahrungswerten. Eine Reihe von experimentellen Untersuchungen dient zum Nachweis bzw. Widerlegen vorhandener Thesen hinsichtlich der Wirkung von Umwelteinflüssen auf die PMA-Lebensdauer und zur Formulierung eines ersten qualitativen Lebensdauermodells, welches die wesentlichen Einflussparameter und ihre Wirkung auf die betrachteten PMA beschreibt, wobei der statistischen Streuung der beobachteten PMA-Lebensdauern noch keine Beachtung geschenkt wird.

Das qualitative Lebensdauermodell bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen im Rahmen des dargestellten Ablaufplans. Hierdurch wird begründet welche Einflussparameter im weiteren Verlauf tiefer untersucht werden. Zu diesem Zweck wird zunächst subjektives Erfahrungswissen, welches z. B. durch den Umgang mit den zu untersuchenden PMA erlangt wurde, oder durch das Studium leicht zugänglicher Literatur, wie beispielsweise Datenblätter und Arbeitsanweisungen der PMA-Hersteller und -Lieferanten, analysiert. Aus diesen Informationen leitet sich die Motivation für weitere Untersuchungen direkt ab, da hierdurch Defekte im Feld (subjektive Erfahrungen) oder potentielle Schwachstellen im Betrieb (Datenblätter, Arbeitsanweisungen) aufgedeckt und beschrieben werden.

Mithilfe einer ersten, rein qualitativen Versuchsreihe wird im Anschluss überprüft, welche der zuvor ermittelten Faktoren in einer realen Anwendung dominant die PMA-Lebensdauer beeinflussen. Hierzu werden alle zuvor ermittelten Einflussfaktoren im Rahmen eines vollfaktoriellen Versuchsplans nach den Regeln des DoE (Design of Experiments) qualitativ untersucht. Um den experimentellen Aufwand gering zu halten, werden die einzelnen Faktoren mit einer geringen Anzahl von Faktorstufen untersucht. Es wird erwartet, dass statistische Effekte einen im Vergleich zu den zu untersuchenden Einflussparametern kleinen Einfluss auf die beobachtete PMA-Lebensdauer haben. Daher sind Statistische Maßzahlen wie Streubreite oder Standardabweichung zu diesem Zeitpunkt von untergeordnetem Interesse und werden im Rahmen dieser Testreihe nicht untersucht. Das Ergebnis ist eine qualitative Klassifizierung der Einflussfaktoren, die es ermöglicht, stichhaltig zu begründen, welche dieser Faktoren im weiteren Verlauf genauer untersucht werden müssen.

Die Ergebnisse des Erfahrungswissens und der Vortests führen zu einem qualitativen Lebensdauermodell, welches die Zusammenhänge zwischen den dominanten Einflussfaktoren und der PMA-Lebensdauer rein qualitativ abbildet. Sie dienen als Grundlage für die zweite Ebene (E2), deren Ziel eine erste quantitative Beschreibung der Zusammenhänge von Einflussparametern und PMA-Lebensdauer, das quantitative PMA-Lebensdauermodell, ist. Hierzu werden zunächst die zuvor formulierten qualitativen Zusammenhänge näher betrachtet und mit Fachwissen in Form von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Studien abgeglichen. Die Einflussparameter werden einzelnen Versagensmechanismen (engl.: Physics of Failure, PoF) zugeordnet. Auf Basis der so gewonnenen Daten und der Ergebnisse des qualitativen PMA-Lebensdauermodells wird eine zweite Reihe experimenteller Tests geplant und durchgeführt. Nach der Quantifizierung der Wirkung der dominanten Einflussparameter auf die PMA-Lebensdauer werden mit Hilfe eben dieser Zusammenhänge die im Experiment ermittelten Lebensdauern auf eine synthetische Standardbelastung bezogen (siehe Kap. 5.7.7) und die resultierenden, relativen Lebensdauern statistisch ausgewertet. Anschließend werden mittels geeigneter Verfahren die Ergebnisse der Haupttests und des qualitativen Lebensdauermodells unter Berücksichtigung des Fachwissens kombiniert. Das resultierende quantitative Lebensdauermodell ermöglicht erstmalig, die zu erwartende PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit von gegebenen Einflussparametern zu schätzen.

Die dritte Ebene, die Verifizierungs-Ebene (E3), schließt sich der quantitativen Ebene an und hat zum Ziel, das quantitative Lebensdauermodell und das Vorgehen zur dessen Entstehung kritisch zu hinterfragen, Möglichkeiten zur Optimierung zu identifizieren und die Gültigkeit des Modells experimentell zu bestätigen. Hierzu werden im Rahmen eines Methodenvergleichs die angewendeten Verfahren (Regressionsanalyse, Weibullanalyse) kritisch hinterfragt und anschließend Alternativen aufgezeigt und angewendet. Die experimentell gewonnenen Daten der Haupttests werden hierzu mithilfe verschiedener alternativer Methoden erneut ausgewertet, die Ergebnisse mit denen des quantitativen Lebensdauermodells verglichen und auf Plausibilität überprüft. Anschließend wird eine finale experimentelle Testreihe geringen Umfanges durchgeführt. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Minimierung der Auswirkungen statistischer Einflüsse auf die Ergebnisse. Im Rahmen eines neuen Testverfahrens, welches auf Step-Stress-Testing aufbaut, werden hierzu die Proben schrittweise steigenden Belastungen ausgesetzt und die Degradation der jeweiligen Probe kontinuierlich erfasst und der jeweiligen Belastungsstufe gegenübergestellt. Auf diese Weise ist es möglich, genaue Aussagen über die Wirkung einzelner Einflussparameter auf die PMA-Lebensdauer zu treffen und so das zuvor erzeugte quantitative PMA-Lebensdauermodell zu verifizieren. Das angesprochene Test-Verfahren zeichnet sich neben der Notwendigkeit von geringen Stichprobenumfängen durch einen zügigen Testverlauf und damit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand aus.

5.2 Erfahrungswissen

Im Laufe der vergangenen Jahre konnte eine Vielzahl von subjektiven Eindrücken und Erfahrungen im Umgang mit PMA gewonnen werden. So zeigte sich im Betrieb von Ceramtec Sonox P505 Aktoren, dass diese bei Verwendung in adaptronischen Anwendungen im Wesentlichen auf zwei Arten ausfallen.

Zum einen werden PMA in Folge unsachgemäßer Handhabung, insbesondere während der Montage, bei oder kurz nach der Inbetriebnahme mechanisch zerstört. Das Spektrum reicht an dieser Stelle von abgeplatzten Kanten bis hin zu vollständigen Durchbrüchen unter Winkeln von 90° oder 45° zur PMA-Längsachse.

Solche Frühausfälle (S. 21, Badewannenkurve) beruhen in erster Linie auf Handhabungs- und Montagefehlern, welche nicht systematisch quantifiziert werden können. Sie sind direkt und individuell vom Anwender abhängig und damit für eine Beschreibung in Form eines generellen Lebensdauermodells nicht zugänglich, weshalb sie im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet werden.

Als zweite mögliche Ausfallart werden elektrische Kurzschlüsse in verschiedenen Aufbauten beobachtet. Die Beobachtungen bestätigen somit Ausfälle, die ähnlich in der Literatur beschrieben sind [35, 36].

Als Ursache für die Ausfälle werden unterschiedliche Mechanismen vermutet, jedoch scheint unabhängig vom eigentlichen Mechanismus ein Zusammenhang zwischen der zu erwartenden Lebensdauer und den Umgebungslasten (Temperatur, relative Feuchte) sowie der elektrischen Belastung zu bestehen. Daher wird im Folgenden zunächst geklärt, welche Lasten in adaptronischen Anwendungen zu erwarten sind, ehe anschließend die daraus resultierenden Fehlermechanismen mit denen anderer Anwendungen verglichen werden.

5.2.1 Belastungen in der Adaptronik

Eine Definition eines allgemeingültigen Belastungsprofils adaptronischer Systeme ist bislang nicht möglich. Eine exakte Beschreibung der zu erwartenden Belastungen muss anwendungsabhängig und daher für jedes zu betrachtende System individuell erfolgen. Anhand einiger grundlegender Überlegungen sollen die Betriebs- und Umgebungslasten, denen ein adaptronisches System in verschiedenen Anwendungen ausgesetzt sein kann, jedoch veranschaulicht werden. Anschließend wird erörtert, unter welchen Voraussetzungen auch bei teilweiser Unkenntnis der wirkenden Belastungen die PMA-Lebensdauer geschätzt werden kann.

5.2.1.1 Umgebungslasten in stationären adaptronischen Anwendungen

Zu den stationären Anwendungen adaptronischer System zählen z. B. Systeme zur Schwingungskontrolle von Produktionsanlagen oder zur aktiven Lagerung von Aggregaten. Die Temperaturen in stationären Anwendungen sind in der Regel gemäßigt und liegen typischerweise zwischen 10 °C und 30 °C, in Extremfällen wie z. B. Anlagen zur Papierproduktion jedoch auch höher bei bis zu 50 °C [74]. Die Luftfeuchte ist in der Regel ebenfalls an den meisten Standorten gemäßigt und mit Blick auf die Gesundheit der Mitarbeiter kontrolliert, so dass je nach Witterungslage und Möglichkeiten zur Klimatisierung relative Luftfeuchten zwischen 40 % und 60 %, welche von Menschen als angenehm empfunden werden, angestrebt werden. Im Falle sehr wasserintensiver oder feuchteempfindlicher Produktionsprozesse oder klimatisch extremer Standorte kann jedoch das gesamte Spektrum von trockener bis hin zu gesättigter Luft erreicht werden.

5.2.1.2 Umgebungslasten in mobilen adaptronischen Anwendungen

Bei Anwendungen in mobilen Systemen kann generell zwischen unterschiedlichen Bereichen innerhalb des Fahr- oder Flugzeuges unterschieden werden. Die Bereiche, welche für den Aufenthalt von Personen vorgesehen sind, und jene, die außerhalb dieser meist klimatisierten Bereiche liegen.

Besonders trocken ist z. B. die Luft an Bord von Flugzeugen, da die das Flugzeug umgebende Luft in großen Höhen sehr kalt und damit zwangsweise trocken ist und durch die Klimaanlage des Flugzeuges nur geringfügig mit Feuchtigkeit angereichert wird. Eine zu hohe Luftfeuchtigkeit könnte zu ungewollter Kondensation im Inneren des Flugzeuges führen. So werden je nach Flugzeugtyp und Sitzplatz Luftfeuchten im Inneren der Passagierkabine von unter 10 % gemessen [75]. In Teilen außerhalb des klimatisierten Bereichs ist im Flugbetrieb mit noch niedrigeren Luftfeuchten zu rechnen. Bei Aufenthalten in tropischen Regionen hingegen können Komponenten außer-

halb des klimatisierten Bereichs Luftfeuchten von bis zu 100 % r. H. bei gleichzeitig hoher Lufttemperatur von bis zu 45 °C ausgesetzt sein. Die Außentemperatur auf Reiseflughöhe kann -50 °C unterschreiten. Es ist ersichtlich, dass Systeme, die an und in Flugzeugen verbaut sind, sehr großen Schwankungen in Bezug auf Temperatur und Feuchte unterliegen können.

Bei maritimen Anwendungen fallen die Schwankungen für gewöhnlich geringer aus, die Feuchte jedoch ist dauerhaft auf sehr hohem Niveau.

Fahrzeuge an Land können ebenfalls einem sehr großen Spektrum von Feuchte und Temperatur unterworfen sein. Selbst in gemäßigten Klimazonen wie Mitteleuropa werden regelmäßig Feuchten von 100 % r. H. erreicht, welche beispielsweise zur Betauung von Komponenten führen können. Am Beispiel der Luftfeuchte in Darmstadt im März 2015 sei dies illustriert. Bild 22 zeigt die jeweiligen Höchst- und Tiefstwerte der relativen Luftfeuchte für die einzelnen Tage des März. Man erkennt, dass im Durchschnitt an jedem zweiten Tag der Höchstwert 100 % r. H. erreicht wurde und mit Ausnahme eines Tages (14.03.2015) stets über 80 % lag. Die Tiefstwerte unterschritten an lediglich 4 Tagen den Wert von 40 %. Es ist ersichtlich, dass auch in gemäßigten Klimazonen regelmäßig hohe Luftfeuchten vorliegen, denen adaptronische Systeme in mobilen Anwendungen ausgesetzt sind.

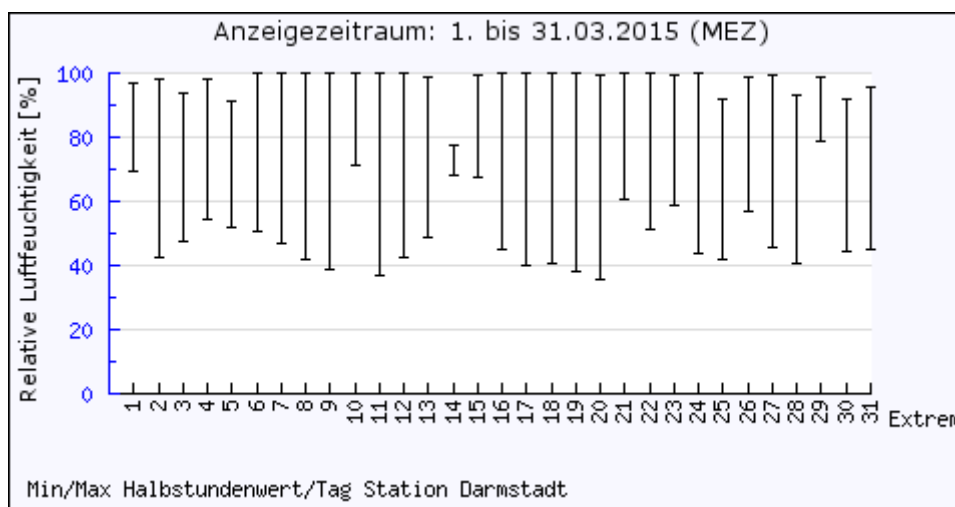


Bild 22: Extremwerte der Luftfeuchte im März 2015 in Darmstadt. Auch in Mitteleuropa herrscht kontinuierlich ein hohes Feuchteniveau. [76]

5.2.1.3 Elektrische Lasten adaptronischer Systeme

PMA werden in der Adaptronik in der Regel unipolar betrieben. PMA sind allgemein nicht für den bipolaren Betrieb, wie er z. B. in der Ultraschalltechnik üblich ist, geeignet. Ein sesquipolarer Betrieb, wie in [18] beschrieben, eine Überlagerung eines bipolaren Signals, z.B. einer Sinusfunktion mit einer konstanten Spannung geringer Höhe, ist grundsätzlich denkbar, findet bislang jedoch lediglich in Ausnahmefällen Verwendung, da PMA allgemein empfindlich gegenüber bipolarem Betrieb sind (Kapitel 2.1.1.2). Systeme zur Kompensation periodischer Schwingungen nutzen typischerweise sinusförmige Ansteuersignale. Diese reduzieren die Verlustleistung im PMA und damit

die Erzeugung von Abwärme. Je nach Anwendung sind jedoch auch andere Ansteuersignale möglich. Durch die hohe erreichbare Dynamik ist das Spektrum möglicher Signalformen bis hin zu näherungsweise Rechtecksignal möglich. Die Grenzen zwischen adaptronischen Anwendungen und quasi-statischem Betrieb einerseits sowie hochdynamischen Anwendungen andererseits verlaufen fließend, so dass eine eindeutige Abgrenzung nicht möglich ist. Das Frequenzspektrum reicht anwendungsabhängig von wenigen Hertz, z. B. zur Schwingungsminderung einer Produktionsanlage, bis in den Bereich mehrerer Kilohertz zur Reduktion ungewollter akustischer Phänomene im Luftverkehr.

5.2.1.4 Berücksichtigung variierender Belastungen auf die PMA-Lebensdauer

Es wurde gezeigt, dass die Umgebungslasten, die auf ein adaptronisches System wirken, deutlichen Schwankungen im Laufe der Produktlebensdauer unterworfen sein können. Auch die Betriebslasten können entsprechend variieren, was einer eindeutigen und allgemeingültigen Bestimmung der Zuverlässigkeit eines adaptronischen Systems entgegensteht, auch wenn die Anwendung formal eindeutig definiert ist.

Vergleichbaren Herausforderungen sieht sich häufig die Betriebsfestigkeit gegenübergestellt. Während einzelne Einheiten eines mechanischen Systems deutlich voneinander abweichenden Belastungen ausgesetzt sein können, kann der zeitliche Verlauf der wirkenden Belastung auf eine einzelne Einheit über die Lebensdauer ebenfalls deutlichen Schwankungen unterworfen sein. Um die Lebensdauer eines solchen Systems im Mittel dennoch bestimmen zu können, haben sich in der Betriebsfestigkeit in den vergangenen Jahrzehnten diverse Methoden, Rechenvorschriften und Modelle etabliert, die häufig auf der Ermittlung von Referenzwerten und Belastungskollektiven basieren. An Material- und Bauteilproben wird die Belastbarkeit in Abhängigkeit der Lebensdauer, z. B. im Rahmen eines Wöhlerversuchs, ermittelt und die resultierende Wöhlerlinie anschließend mit dem für das Bauteil erwarteten Lastkollektiv verrechnet. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist die Schadenssumme des Kollektivs, welche Rückschlüsse auf die zu erwartende Lebensdauer einer, dem angenommenen Kollektiv entsprechend belasteten, Probe erlaubt. Grundlage dieser Berechnung ist häufig die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Pilgrem / Miner, bei der der Einfluss der Reihenfolge der einzelnen Lastamplituden vernachlässigt wird. Mit Hilfe von zusätzlichen Sicherheits- und Korrekturfaktoren kann sichergestellt werden, dass Einheiten, welche in Maßen überlastet oder in Folge von z. B. herstellungsbedingten Streuungen über verminderte Belastungsfähigkeiten verfügen, die erforderliche Lebensdauer mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit erreichen. In [82] finden sich ausführliche Informationen zur Lebensdauerberechnung in der Betriebsfestigkeit.

Ein vergleichbares Vorgehen ist auch auf PMA anwendbar, selbst dann, wenn nicht alle Umgebungs- und Betriebslasten und deren zeitlicher Verlauf exakt bekannt sind. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass auch für PMA eine kontinuierliche Schadensakkumulation gilt, bei der die zeitliche Reihenfolge der einzelnen Belastungsstufen eines Kollektivs von untergeordneter Bedeutung ist. Diese Annahme stützt sich auf Beobachtungen wie sie in der Literatur beschrieben sind

[9, 39] sowie auf eigene Untersuchungen, welche im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführt wurden und den zeitlichen Verlauf der Leckstromzunahme von PMA unter elektrischer Belastung in feuchter Umgebung darstellt [1].

Während die Umgebungslasten, z.B. Temperatur oder Feuchte, durch Messungen über längere Zeiträume gut erfasst und entsprechende Kollektive geschätzt werden können, ist bei der Ermittlung der Betriebslasten, elektrisches Feld oder mechanische Spannungen, ein direktes Messen vor der Realisierung eines ersten Prototyps oftmals nicht möglich. An dieser Stelle ist das Erfahrungswissen der Entwickler notwendig, um die wirkenden Belastungen zu schätzen.

Die Belastbarkeit von PMA gegenüber wirkenden Belastungen kann mit Hilfe des in Kapitel 5.1 vorgestellten Ablaufplans ermittelt werden. Das Ziel ist eine modellhafte Beschreibung der PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der wirkenden Lasten. Dieses kann, vergleichbar einer Wöhlerlinie in der Betriebsfestigkeit, dazu genutzt werden, die schädigende Wirkung einzelner Belastungsstufen auf den PMA zu ermitteln und die zu erwartende Überlebenswahrscheinlichkeit für diesen zu bestimmen.

5.2.2 Ausfallmechanismen in Abhängigkeit der Anwendung

Nach dem Studium leicht zugänglicher Literatur, wie z. B. Datenblätter und Produktkataloge von Herstellern [25], ist ersichtlich, dass die in Kapitel 2.2 vorgestellten Ausfallmechanismen in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussparameter wie z. B. Temperatur, Feuchte, mechanische oder elektrische Spannung auftreten können. Da diese Einflussparameter unterschiedlich in Abhängigkeit der jeweiligen Anwendung auftreten, können bestimmten Anwendungsfällen einzelne Ausfallmechanismen zugeordnet werden.

Allgemein können Belastungen abhängig von der Anwendung in Betriebs- und Umgebungslasten unterteilt werden. Zu ersteren gehören im Falle der PMA z. B. die elektrische Feldstärke als Resultat der angelegten elektrischen Spannung oder auch mechanische Spannungen infolge wirkender Kräfte. Zu den Umgebungslasten zählen in erster Linie Umwelteinflüsse wie Temperatur und Feuchte, aber auch mögliche Verschmutzungen oder Strahlung. Die Eigenerwärmung infolge des dynamischen Betriebs nimmt eine Sonderposition ein, da diese einerseits von der Betriebsart (Kräfte, Stellwege, Frequenz), gleichzeitig aber auch von Umweltfaktoren wie Konvektion und Wärmeübergang abhängt. Die Unterscheidung ist für den Anwender nützlich, da er in der Regel nur auf die Betriebslasten direkt Einfluss nehmen kann. Lassen die Umwelteinflüsse Schädigungen erwarten, ist er gefordert, entsprechende Schutzmaßnahmen wie beispielsweise Gehäuse oder aktive Kühlungen in das Gesamtsystem zu integrieren. Die Umsetzung solcher Schutzmaßnahmen, z. B. Abdichtung gegen eindringende Feuchte, ist im Falle adaptronischer Anwendungen und Systeme meist kostenintensiv und steht damit der Verbreitung adaptronischer Systeme entgegen. Die genaue Kenntnis der Belastbarkeit des PMAs ist daher eine Voraussetzung für ein kostengünstiges adaptronisches System.

Den Belastungen steht die Belastbarkeit des PMAs gegenüber. Diese lässt sich weiter in material- und designabhängige Komponenten zerlegen, auf welche der Anwender in aller Regel jedoch keinen Einfluss hat. Das nachfolgende Bild 23 zeigt die Zusammenhänge schematisch.

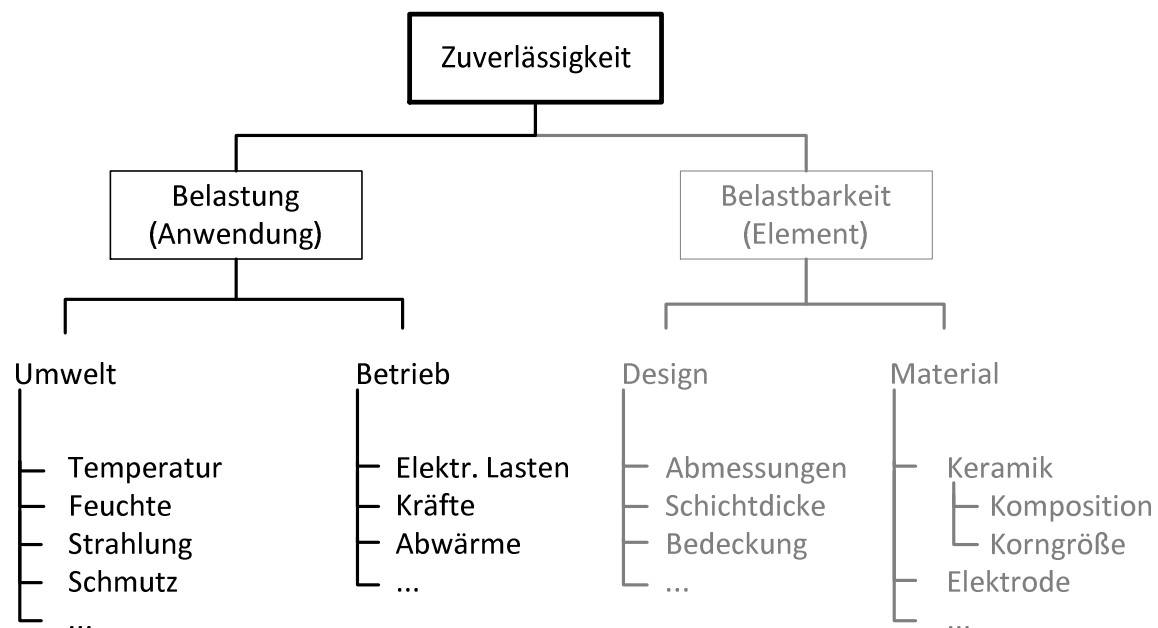


Bild 23: Einflüsse auf die PMA-Zuverlässigkeit; den Belastungen Umwelt- und Betriebslasten, steht die Belastbarkeit gegenüber.

Jeder Fehlermechanismus setzt eine Kombination bestimmter Umgebungs- und Betriebslasten voraus. Insbesondere die Kombination aus Feuchte und elektrischem Gleichfeld stellt hierbei für die Zuverlässigkeit von PMA eine Herausforderung dar, da durch das Gleichfeld polare Wassermoleküle angezogen werden, die eine Zunahme des Leckstroms bewirken und so letztlich zum Ausfall führen können [36]. Andere Ausfallmechanismen für PMA treten in der Regel bei hohen Frequenzen und Amplituden auf. Während in der Ultraschalltechnik die verwendeten PMA bipolar betrieben werden, wodurch es zu Schaltvorgängen auf Domänenebene kommen kann, werden PMA in der Adaptronik unipolar betrieben, so dass Ermüdung in Folge von Domänenschalten nicht zu erwarten ist.

Hohe thermische Belastungen, wie sie z. B. in der Kraftstoffeinspritzung durch die hohen Takraten und steilen Flankenwinkeln des Anregungssignals wie auch in der Ultraschalltechnik durch die hohen Frequenzen bei gleichzeitig großen Dehnungsamplituden vorherrschen, sind in der Adaptronik ebenfalls nicht zu erwarten. Zum einen sind die Frequenzen in adaptronischen Systemen im Durchschnitt deutlich geringer, typischerweise zwischen 10 und 500 Hz, so dass vom PMA wenig Energie dissipiert wird. Zum anderen ist die Umgebungstemperatur in adaptronischen Anwendungen häufig gering (bis 80 °C) im Vergleich zur Anwendung in der Verfahrenstechnik (Ultraschall) oder dem Einsatz in einer Verbrennungskraftmaschine (Kraftstoffeinspritzung), wo Temperaturen von z. T. deutlich über 100 °C auftreten.

Mechanisches Versagen in Form von Mikro- oder Makrorissen ist in der Adaptronik untypisch, aber nicht gänzlich auszuschließen. Während makroskopische Risse besonders durch hohe Trägheitskräfte verursacht werden und somit maßgeblich von der Arbeitsfrequenz abhängen, entstehen Mikrorisse vornehmlich bei hohen Dehnungsamplituden. Zwar treten derartige Defekte lokal in PMA auch in adaptronischen Anwendungen auf, jedoch können diese entweder toleriert werden (Mikrorisse) oder es kann durch geeignete Vorkehrungen, z. B. Sicherstellen einer ausreichenden mechanischen Vorspannung, ein Fortschreiten der Schädigung bis zum globalen Ausfall sicher vermieden werden (makroskopischer Bruch). So empfehlen die Hersteller von PMA allgemein, diese mit rund 50 % ihrer Blockierkraft (F_B) mechanisch vorzuspannen [25]. Hierdurch wird wirkungsvoll vermieden, dass durch Fliehkräfte im dynamischen Betrieb Zugspannungen im PMA auftreten und diesen zerstören.

Eine Übersicht der einzelnen Versagensmechanismen ist in Bild 24 dargestellt. Ihnen sind die typischen Anwendungsfelder gegenübergestellt. Die Einteilung der Anwendungen erfolgte hierbei qualitativ nach dem statischen bzw. dynamischen Anteil des elektrischen Anregungssignals. Insbesondere bei hohem statischen Anteil der Anregung, wie er in der Mikropositionierung, aber eben auch in der Adaptronik vorkommt, nimmt der Einfluss der Feuchte zu, so dass vermehrt mit Ausfällen in Folge von unzulässigen Leckströmen zu rechnen ist.

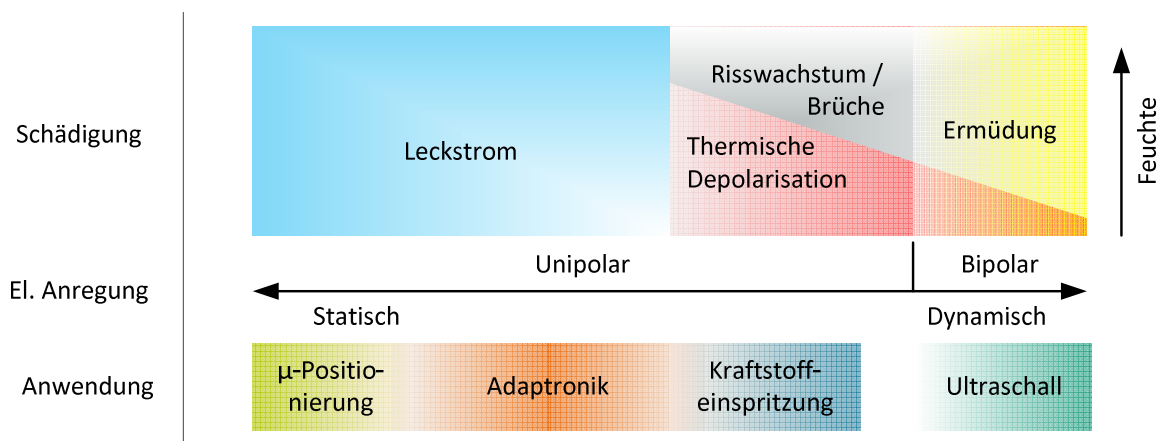


Bild 24: Nicht abschließende schematische Darstellung der Degradation in PMA in Abhängigkeit von elektrischer Anregung und Feuchte.

Allgemein ist festzuhalten, dass die Fehlermechanismen elektrische Ermüdung, thermische Depolarisation und mechanisches Versagen seit langer Zeit im Fokus von Wissenschaft und Forschung stehen und diese nicht nur umfangreich verstanden (vergl. Kapitel 2.1), sondern in den jeweiligen Anwendungen auch weitestgehend beherrscht werden. Demgegenüber steht die noch junge Disziplin der Adaptronik mit für PMA neuartigen Belastungen. Das wirtschaftliche Interesse der PMA-Hersteller an adaptronischen Anwendungen und Systemen ist noch in der Entwicklung und dementsprechend das Wissen rund um entsprechende Fehlermechanismen und Ausfallursachen noch gering im Vergleich zu den vorgenannten. So erklärt sich auch, dass die dargestellten Fehlerme-

chanismen scheinbar eine „Lücke“, einen Bereich mit nur geringer Färbung, im Bereich der Adaptronik aufweisen, welche fälschlicherweise derart interpretiert werden könnte, dass in adaptronischen Anwendungen wenige Ausfälle an PMA beobachtet würden. Tatsächlich ist diese „Lücke“ auf einen, im Verhältnis zu anderen Ausfallursachen und -mechanismen, geringen Wissensstand zurückzuführen.

Wie weiter zu erkennen ist, sind in adaptronischen Anwendungen vorrangig Ausfälle aufgrund unzulässiger Leckströme zu erwarten. Arbeiten zu den zugrundeliegenden Mechanismen der Sauerstoffleerstellen- und Elektromigration wurden in Kapitel 2.1.1.4 dargestellt.

5.3 Vortests

Aus der subjektiven Erfahrung und der Analyse leicht zugänglicher Informationen resultiert die Einschätzung, dass hohe Luftfeuchte eine plausible Erklärung für Ausfälle ist, die in verschiedenen Aufbauten beobachtet wurden. Weiter ist bekannt, dass jene Fehlermechanismen, die im Wesentlichen durch Umgebungsfeuchte hervorgerufen werden, ebenfalls sensitiv auf die Umgebungstemperatur und das anliegende elektrische Feld reagieren (Kapitel 2.3). Entsprechend wird in der ersten experimentellen Testreihe untersucht, welche dieser drei möglichen Umgebungs- und Lastparameter einen wesentlichen Einfluss auf die PMA-Lebensdauer haben.

5.3.1 Planung und Durchführung

Um den experimentellen Aufwand für diese erste experimentelle Untersuchung gering zu halten, werden im Rahmen der Vortests lediglich zwei verschiedene Temperatur- und Feuchteeinstellungen untersucht, die über die jeweilige Versuchsdauer konstant gehalten werden. Da lediglich der Nachweis der Wirksamkeit dieser Einflussparameter und etwaige Wechselwirkungen im Fokus stehen, ist eine Untersuchung weiterer Faktorstufen zu diesem Zeitpunkt nicht nötig. Zwar ist derzeit nicht mit einem linearen Zusammenhang zwischen Faktorstufe und PMA-Lebensdauer zu rechnen, dennoch sind zwei Faktorstufen je Parameter zu diesem Zeitpunkt ausreichend. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass zwischen den jeweiligen Faktorstufen keine Extremwerte zu erwarten sind [77, 78]. Die Faktorstufen werden derart gewählt, dass die Ausprägung des jeweiligen Merkmals hoch ($T = 80^{\circ}\text{C}$, $H = 85\%$) bzw. niedrig ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $H = 5\%$) ist, um den Klimabereich, in dem eine Vielzahl adaptronischer Systeme betrieben werden, abzubilden.

Zur Untersuchung des Einflusses der elektrischen Anregung werden insgesamt vier verschiedene Kombinationen aus statischer Offsetspannung und Amplitude bei gleichbleibender Frequenz von 50 Hz ausgewählt. Bild 25 zeigt schematisch den jeweiligen Signalverlauf. Die gewählte Frequenz entspricht der unteren Grenze typischer adaptronischer Anwendungen, wie sie z. B. zur Schwingungskontrolle eingesetzt werden. Höhere Frequenzen würden gemäß Formel 2.16 zu einer höheren Verlustleistung des PMAs führen. Der daraus resultierende Einfluss auf die PMA-Lebensdauer kann durch die Variation der Spannungsamplitude, welcher quadratisch in den Verlustterm eingeht, bereits abgebildet werden, so dass eine zusätzliche Untersuchung dieses Einflussfaktors nicht notwendig ist. Gleiches gilt für andere Signalformen als den gewählten Sinus. Zu Gunsten eines überschaubaren Versuchsplans wird daher auf die Untersuchung der Einflussparameter Signalform und Anregungsfrequenz im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Diese vier Anregungssignale geben Aufschluss darüber, ob bei gleicher Offsetspannung die Amplitude des Signals einen Einfluss auf die PMA-Lebensdauer hat (Signal 1 – Signal 2) und gleichzeitig im Umkehrschluss bei gleicher Amplitude die PMA-Lebensdauer vom elektrischen Offset beeinflusst wird (Signal 2 – Signal 3). Das vierte Signal ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse zu vorangegangenen Arbeiten, bei denen in der Regel im elektrischen Gleichfeld gemessen wurde. Eine bi- oder sesquipolare Anregung wird aufgrund der Verwendung von PMA ausgeschlossen. In

Summe resultiert hieraus ein Versuchsplan mit insgesamt 16 verschiedenen experimentellen Messungen, von denen jeweils vier gleichzeitig in der zur Verfügung stehenden Klimakammer durchgeführt werden (Tabelle 2).

Die den Versuchen zugeordneten elektrischen Spannungen sind in Bild 25 grafisch dargestellt.

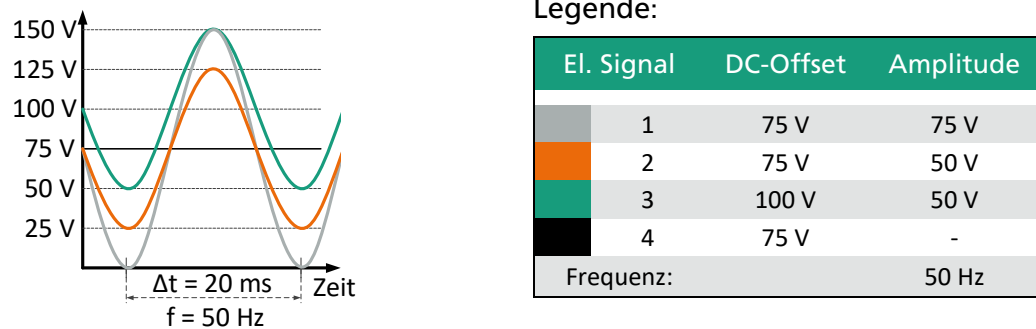


Bild 25: Grafische Darstellung der vier unterschiedlichen elektrischen Anregungssignale während der Vortests.

Tabelle 2: Versuchsplan Vortests Ceramtec SP505

Ver- suchs- nummer	Versuchs- serie	r. H.	Temp.	El. Signal
V1	1	85 %	80 °C	1
V2	1	85 %	80 °C	2
V3	1	85 %	80 °C	3
V4	1	85 %	80 °C	4
V5	2	85 %	20 °C	1
V6	2	85 %	20 °C	2
V7	2	85 %	20 °C	3
V8	2	85 %	20 °C	4
V9	3	5 %	80 °C	1
V10	3	5 %	80 °C	2
V11	3	5 %	80 °C	3
V12	3	5 %	80 °C	4
V13	4	5 %	20 °C	1
V14	4	5 %	20 °C	2
V15	4	5 %	20 °C	3
V16	4	5 %	20 °C	4

5.3.2 Ergebnisse der Vortests

Nachfolgend sind die quantitativen Ergebnisse der Versuchsreihe „Vortests“ dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen bei hoher Feuchte ($H = 85 \% r. H.$) finden sich in Tabelle 3. Nach Rücksprache mit Anwendern wurde die Dauer bis zum Erreichen eines Leckstroms von $I_L = 4 \text{ mA}$ als Lebensdauer definiert. Der Grenzwert hängt neben dem zu untersuchenden PMA wesentlich

von der Anwendung ab und ist für andere Kombinationen individuell festzulegen. Hierbei muss sichergestellt sein, dass dieser Wert von allen Einheiten der zu untersuchenden Stichprobe sicher erreicht werden kann und ausreichend groß bemessen ist um genaue Messungen zu ermöglichen. 25% bis 50% des maximalen Leckstroms vor dem Durchbrennen einer beliebigen Probe eines PMA hat sich hierbei als geeigneter Richtwert erwiesen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Vortests bei hoher relativer Feuchte (85 %)

Versuchsnummer	Versuchsserie	Temp. [°C]	El. Signal	Lebensdauer [h]
V1	1	80	1	2
V2	1	80	2	1,5
V3	1	80	3	1,5
V4	1	80	4	2
V5	2	20	1	> 20
V6	2	20	2	7,5
V7	2	20	3	3
V8	2	20	4	3

Da bei den Untersuchungen mit niedriger Feuchte ($H = 5 \% r. H.$) der Grenzwert von $I_L = 4 \text{ mA}$ bei sechs PMA auch nach einer Versuchsdauer von $t = 168 \text{ h}$ nicht erreicht wurde, wurde zur Bewertung dieser Messungen der maximale Leckstrom zum Testende herangezogen. Die Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand von direkten Gegenüberstellungen ausgewählter Messkurven analysiert. Im Anschluss daran werden in den folgenden Unterkapiteln die jeweiligen Fehlermechanismen diskutiert. Die folgenden Messkurven sind immer derart dargestellt, dass der Leckstrom I_L in mA über der Zeit in Stunden aufgetragen ist. Die jeweiligen klimatischen und elektrischen Bedingungen sind der jeweiligen Bildunterschrift zu entnehmen. Als Ausfallkriterium wurde wie auch in den folgenden Messreihen ein Leckstrom-Grenzwert von $I_L = 4 \text{ mA}$ gewählt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Vortests bei niedriger relativer Feuchte (5%)

Versuchsnummer	Versuchsserie	Temp. [°C]	El. Signal	Leckstrom nach 168 h [mA]
V9	3	80	1	0
V10	3	80	2	3
V11	3	80	3	3
V12	3	80	4	-
V13	4	20	1	0
V14	4	20	2	0,3
V15	4	20	3	3
V16	4	20	4	5

5.3.3 Abschätzung des Einflusses der relativen Feuchte

Hierzu werden zwei korrespondierende Leckstromkurven verglichen, von denen eine bei niedriger, die andere bei hoher Umgebungsfeuchte aufgenommen wurde. Die elektrische Belastung und Umgebungstemperatur während der Tests war für beide Proben gleich und konstant. Es fällt auf, dass die Feuchte einen eindeutigen Einfluss auf die Lebensdauer der PMA hat. So zeigt z. B. der Vergleich zweier Kurven bei $T = 80\text{ °C}$ (Bild 26a), dass sich der Zeitpunkt der ersten zweifelsfrei messbaren Zunahme des Leckstroms von $t < 1\text{ h}$ ($H = 85\text{ \% r.H.}$) auf $t > 100\text{ h}$ ($H = 5\text{ \% r.H.}$) erhöht. Während die Probe bei hoher Feuchte eine Lebensdauer ($I_L < 4\text{ mA}$) von rund 2 h aufweist wird von der Probe, die einer niedrigen Feuchte ausgesetzt ist, der kritische Wert für I_L während der gesamten Testdauer von 168 h nicht erreicht.

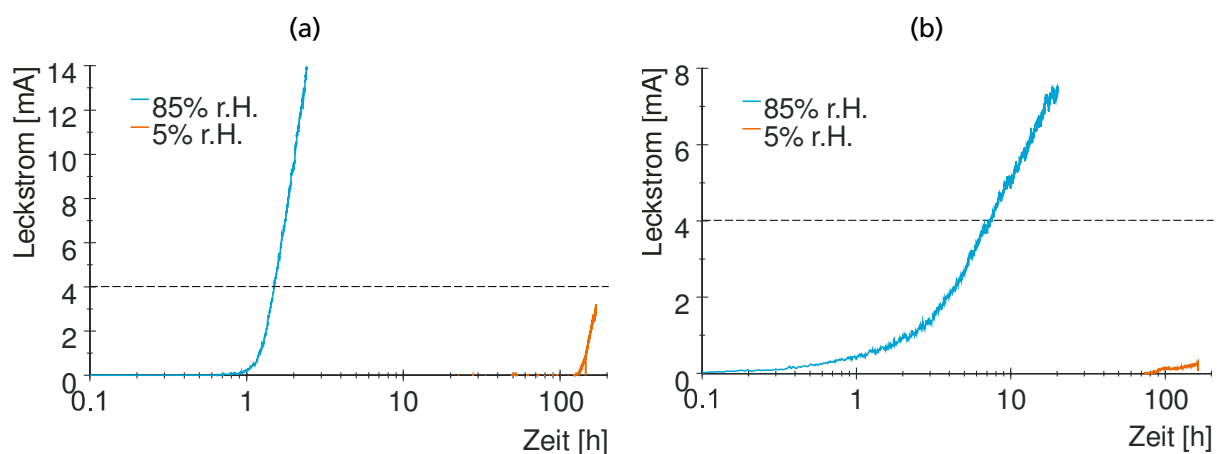


Bild 26: Vergleich zweier Leckstrom-Kurven bei 85 % und 5 % r. H. bei 80 °C (a) und 20 °C (b). Deutlich frühere Zunahme des Leckstroms bei hoher r.H..

Auch für andere elektrische Anregungssignale oder Temperaturen ergibt sich insgesamt ein ähnliches Ergebnis. So zeigt z. B. der Vergleich zweier korrespondierender Messkurven bei $T = 20\text{ °C}$ (Bild 26b), dass der bei hoher Feuchte getestete Aktor erneut eine Lebensdauer von wenigen Stunden aufweist und unmittelbar mit Testbeginn ein messbarer Leckstrom vorliegt, wohingegen der Aktor, der bei gleicher Temperatur mit dem gleichen elektrischen Signal, jedoch bei niedriger relativer Feuchte getestet wird, während der gesamten Testdauer (168 h) nicht final ausfällt. Auch der erste messbare Anstieg des Leckstroms erfolgt mit ca. 75 h wesentlich später als bei der Probe, die einer Feuchte von $H = 85\text{ \% r.H.}$ ausgesetzt war.

5.3.4 Abschätzung des Temperatureinflusses

Beim Vergleich von korrespondierenden Messkurven, die bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen wurden, fällt auf, dass auch die Temperatur einen deutlichen Einfluss auf die Zunahme des Leckstroms hat, jedoch nicht derart dominant ist wie die relative Feuchte.

Vergleicht man z. B. zwei Messkurven, die beide bei $H = 85\text{ \% r.H.}$ und mit dem gleichen elektrischen Signal belastet wurden (Bild 27a), fällt auf, dass der erste sichtbare Anstieg des Leckstroms

in beiden Fällen nach rund einer Stunde auftritt. Einen Leckstrom von 4 mA erreicht die rot dargestellte Kurve ($T = 80\text{ °C}$) nach rund zwei Stunden, die blaue Kurve ($T = 20\text{ °C}$) erreicht diesen Wert auch nach einer Prüfdauer von 20 Stunden nicht. Eine Extrapolation des bis zum Testende gezeigten Kurvenverlaufes lässt auf ein Erreichen des kritischen Wertes zwischen 35 bis 45 Stunden schließen. Der Unterschied in den Lebensdauern der beiden PMA kann folglich mit einem Faktor von rund 20 zugunsten der niedrigen Temperatur geschätzt werden. Beim Vergleich von Kurven, die unter gleichen klimatischen Bedingungen, jedoch unterschiedlicher elektrischer Anregung getestet wurden (Bild 27b), fällt der beobachtbare Unterschied geringer aus. Während die Probe bei hoher Temperatur (80 °C) nach ca. 1,5 Std. einen Leckstrom von $I_L = 4\text{ mA}$ erreicht, erreicht die Probe, die bei 20 °C getestet wurde, diesen Wert nach rund 7 Std.

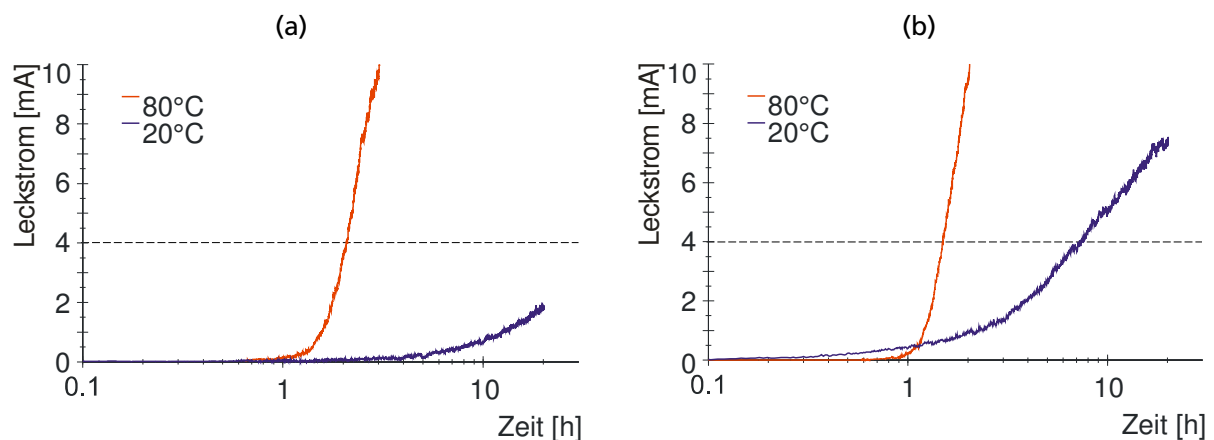


Bild 27: Vergleich von Messkurven bei unterschiedlichen Temperaturen. Deutlich höhere Lebensdauer bei niedriger Temperatur.

Der Vergleich entsprechender Kurven, die bei niedriger r. H. aufgenommen wurden, liefert ähnliche Schlüsse, jedoch bei deutlich längeren Testdauern. So zeigt der Vergleich zwischen zwei Proben bei $H = 5\% \text{ r. H.}$ (Bild 28a) dass der Leckstrom der Probe, die bei niedriger Temperatur ($T = 20\text{ °C}$) untersucht wurde, früher stattfindet, der Verlauf jedoch deutlich flacher ausfällt als bei der Probe, die bei $T = 80\text{ °C}$ getestet wurde. Die extrapolierte Lebensdauer liegt bei dieser nur knapp über der erreichten Prüfdauer von $t = 168\text{ h}$, während die Extrapolation des Leckstroms der Probe, die bei $T = 20\text{ °C}$ getestet wurde, auf eine Lebensdauer der Niedertemperatur-Probe von mehreren tausend Stunden schließen lässt.

5.3.5 Abschätzung des Einflusses des elektrischen Feldes

Der Einfluss des elektrischen Anregungssignals ist in allen Versuchsserien erkennbar und zeigt eine qualitativ gleichbleibende Charakteristik. Zur Darstellung werden Messkurven herangezogen, die im Anschluss der eigentlichen Vortests aufgenommen wurden. Hierbei wurde entgegen der bisherigen Tests das Klima nicht konstant gehalten, sondern bei einer Temperatur von $T = 80\text{ °C}$ die relative Feuchte stufenweise gesteigert. Durch dieses Vorgehen ist der Einfluss des elektrischen Anregungssignals deutlich zu erkennen. Die Steigerung der relativen Feuchte erfolgte dabei nach jeweils 24 h um 10% -Punkte. Als Prüflinge wurden die bereits untersuchten PMA V13 bis V16 (Tabelle 2) verwendet, da diese im Rahmen der Vortests nur geringfügige Schädigungen erlitten,

die zur Bewertung der qualitativen Zusammenhänge von untergeordneter Bedeutung sind. Die resultierenden Messkurven zeigt Bild 28b. Man erkennt, dass mit steigender Amplitude des Anregungssignals die Lebensdauer zunimmt, mit zunehmendem DC-Anteil jedoch die Zeit bis zum Einsetzen des Leckstroms und Erreichen des maximal zulässigen Grenzwertes abnimmt. Auch hängt der Zeitpunkt der ersten Leckstromzunahme vom elektrischen Signal ab. So zeigt z. B. die schwarze Kurve ($U = 75 \text{ V}$) bereits bei $H = 10 \% \text{ r.H.}$ eine eindeutige Zunahme des I_L , während die dynamisch betriebenen Aktoren erst bei $H = 20 \% \text{ r.H.}$ ($100 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$, grün), $30 \% \text{ r.H.}$ ($75 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$, orange) bzw. $40 \% \text{ r.H.}$ ($75 \text{ V} \pm 75 \text{ V}$) zunehmende I_L zeigen.

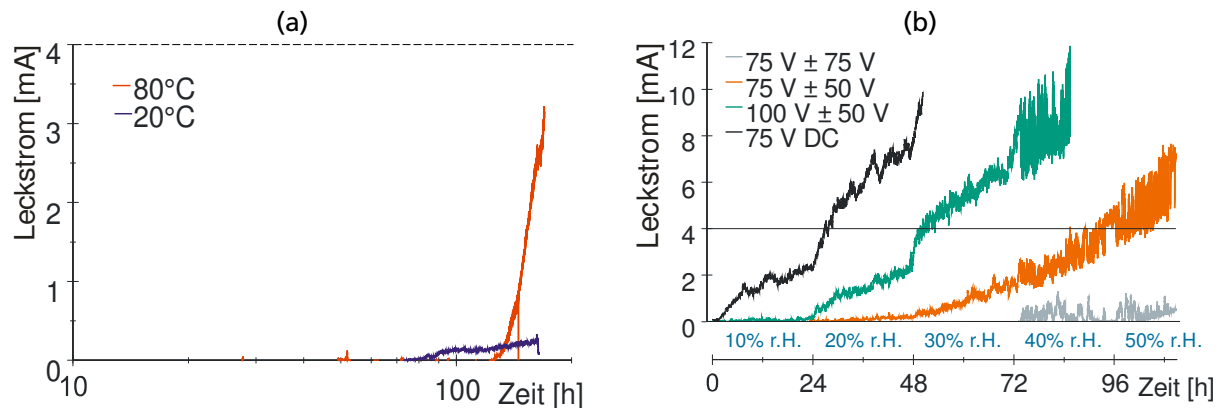


Bild 28: a) Vergleich zweier Messungen bei unterschiedlicher Temperatur.
b) Vergleich verschiedener elektrische Anregungssignale bei stufenweise ansteigender r.H.

5.3.6 Diskussion der Vortestergebnisse

Die Ergebnisse der Vortests bestätigen die Erwartungen. Sowohl der qualitative Verlauf der Kurven als auch die quantitativen Lebensdauerwerte bestätigen, dass die relative Feuchte einen dominanten Einfluss auf die zu erwartende Aktorlebensdauer hat, wobei gilt, dass mit zunehmender Feuchte die Lebensdauer stark abnimmt. Ein ebenfalls deutlicher Einfluss konnte für die Temperatur nachgewiesen werden. Bei sehr niedriger Feuchte (5 % r. H.) wurden jedoch insgesamt keine oder nur geringe Schädigungen auch bei hohen Temperaturen (80 °C) festgestellt, so dass der Einfluss der Feuchte höher zu bewerten ist. Bei hoher Umgebungsfeuchte (85 % r. H.) konnte zweifelsfrei gezeigt werden, dass eine höhere Temperatur – 80 °C im Vergleich zu 20 °C – die Lebensdauer der betrachteten PMA deutlich, um einen Faktor von bis zu 20, herabsetzt. Der Einfluss des elektrischen Anregungssignals war ebenfalls in allen Vortests deutlich zu erkennen. Hierbei muss unterschieden werden zwischen dem statischen Offset und dem dynamischen Anteil. Aus den Vortests kann abgeleitet werden, dass mit zunehmendem Offset die Schädigung nicht nur beschleunigt, sondern auch bereits bei niedrigeren Feuchtwerten stattfindet. Eine höhere Amplitude des Anregungssignals wiederum senkt die Empfindlichkeit der PMA gegenüber Feuchte ab. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in der Eigenerwärmung der PMA, welche bei konstanter Frequenz proportional zu der Spannungsamplitude ist. Durch die erhöhte Oberflächentemperatur des PMAs sinkt lokal in einer Grenzschicht um diesen die relative Feuchte [79], was einem Eindringen von Feuchte in die Oberfläche und damit der Feuchtaufnahme des PMAs entgegenwirkt.

Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf der Arbeit in Tabelle 5 auf nochmals zusammengefasst.

5.4 Qualitatives Lebensdauermodell

Nach den Vortests kann davon ausgegangen werden, dass die drei untersuchten Einflussparameter *Feuchte*, *Temperatur* und *elektrisches Anregungssignal* deutliche Einflüsse auf die PMA-Lebensdauer haben. Der Einfluss der Feuchte erscheint dominant. Aus der Literatur [9, 12, 34] sind Modelle zur Beschreibung der PMA-Lebensdauer bekannt, die den Einfluss der Temperatur wie auch der Feuchte mit Hilfe von Exponentialfunktionen beschreiben bzw. einen linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Lebensdauer und der relativen Feuchte bzw. Temperatur herstellen.

Durch dieses Wissen kann zukünftig unter Vernachlässigung statistischer Effekte im Bereich zwischen zwei Messstellen linear interpoliert werden.

Im weiteren Verlauf werden abwechselnd die PMA-Lebensdauern in Stunden und deren Logarithmen angegeben. Daher werden zur Vermeidung von Verwechslung mit L und Λ zwei eindeutige Kenngrößen eingeführt, die je nach Anwendung im weiteren Verlauf der Arbeit um verschiedene Indizes erweitert werden können. Es gilt fortan:

L : PMA-Lebensdauer in Stunden
 $\Lambda = \ln(L)$: der natürliche Logarithmus der PMA-Lebensdauer in Stunden

In Analogie zur Arrhenius-Funktion kann allgemein definiert werden:

$$L_{(T)} \sim C_T \exp\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5.1)$$

Wobei $L_{(T)}$ die PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der Temperatur (T) beschreibt, C_T ist eine materialabhängige Konstante von unbekanntem Wert.

Der Einfluss der relativen Feuchte kann entsprechend allgemein beschrieben werden:

$$L_{(H)} \sim C_H \exp\left(\frac{1}{r.H.}\right) \quad (5.2)$$

Im Falle der feuchteabhängigen PMA-Lebensdauer $L_{(H)}$ ist neben der Feuchte in % $r.H.$ der Feuchte-Einfluss-Faktor C_H relevant.

Da im Laufe der Vortests festgestellt wurde, dass es zu Wechselwirkungen zwischen der relativen Feuchte und der Temperatur kommt, so dass z. B. mit steigender Temperatur der Einfluss der Feuchte steigt, ist weiter davon auszugehen, dass gilt:

$$C_T = C_T(r.H.) \quad (5.3)$$

$$C_H = C_H(T) \quad (5.4)$$

Hieraus folgt letztlich, dass sich die PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der relativen Feuchte und Temperatur allgemein abschätzen lässt als:

$$L_{(H,T)} \sim \exp\left(\frac{c_T(H)}{T} + \frac{c_H(T)}{H}\right) \quad (5.5)$$

Der so linearisierte Zusammenhang zwischen den beiden dominanten Einflussfaktoren Feuchte und Temperatur kann qualitativ grafisch veranschaulicht werden.

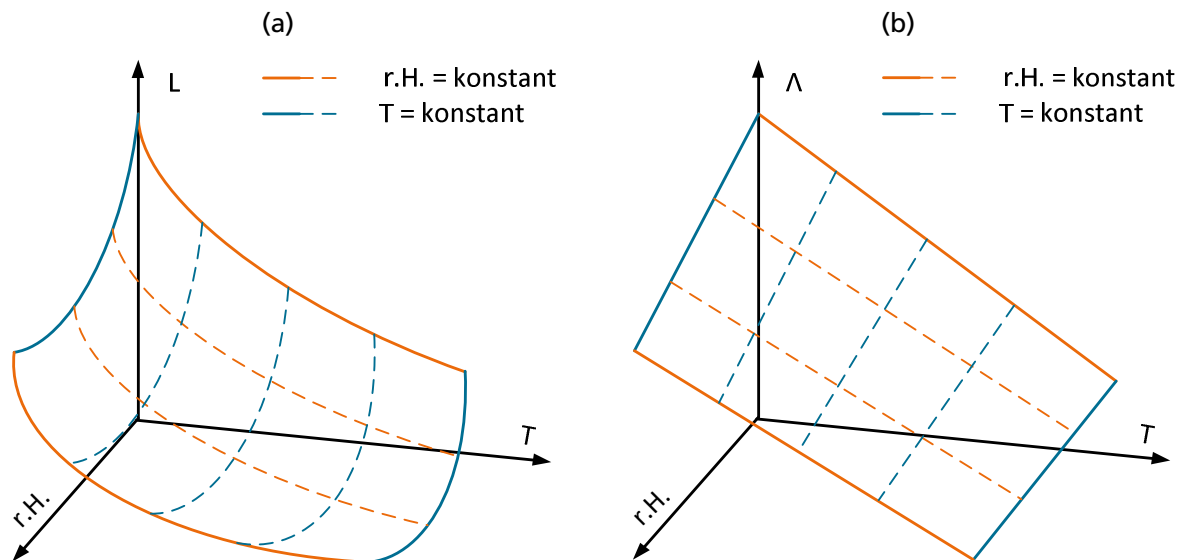


Bild 29: Qualitatives Lebensdauermodell; a) qualitative Darstellung der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Feuchte auf die PMA-Lebensdauer, b) grafische Darstellung des linearen Zusammenhangs zwischen dem Logarithmus der PMA-Lebensdauer und den Einflussparametern Feuchte und Temperatur

Bild 29a zeigt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen relativer Feuchte, Temperatur und PMA-Lebensdauer. Entlang der Niveaus konstanter Feuchte (orange Kurven) nimmt die PMA-Lebensdauer mit zunehmender Temperatur deutlich ab. Analog nimmt die PMA-Lebensdauer ebenfalls für steigende Feuchtwerte bei gleichzeitig konstanter Temperatur (blaue Kurven) ab. Das Maximum der PMA-Lebensdauer wird bei der Kombination aus geringstmöglicher Feuchte und Temperatur erreicht, das Minimum bei der höchstmöglichen Temperatur in Kombination mit der höchstmöglichen Feuchte. In Bild 29b wird der nichtlineare Zusammenhang durch Logarithmieren der Lebensdauerwerte linearisiert. Hierdurch wird eine einfache Möglichkeit geschaffen, beispielsweise durch lineare Interpolation, die Lebensdauerwerte zwischen vorhandenen Datenpunkten zu bestimmen.

Unter dieser Annahme kann ein lineares Gleichungssystem basierend auf vier beliebigen Messwerten innerhalb des Gültigkeitsbereichs des qualitativen Lebensdauermodells erstellt und gelöst werden. Die Ergebnisse dieses Gleichungssystems beschreiben neben den direkten Einflussfaktoren für Feuchte und Temperatur auch die Wechselwirkung sowie eine notwendige Konstante, so dass die Beschreibung der PMA-Lebensdauer in allgemeiner Form ermöglicht wird:

$$\Lambda_{(H,T)} = C_1 H + C_2 T + C_3 H \cdot T + C_4 \quad (5.6)$$

$$L_{(H,T)} = e^{\Lambda_{(H,T)}} \quad (5.7)$$

5.5 Fachwissen

Die ersten experimentellen Untersuchungen (Kapitel 4.2.2) haben die Hypothese, dass die beobachteten Ausfälle der PMA in Zusammenhang mit Umgebungsfeuchte stehen, untermauert. Im Folgenden sollen daher die Ausfallursachen und Fehlermechanismen (PoF) auf Basis verfügbarer Literaturstellen näher erörtert werden. Auf eine materialwissenschaftliche Untersuchung der PoF im Rahmen dieser Arbeit wird bewusst verzichtet, da diese nicht im Fokus der Arbeit liegen. Stattdessen wird verfügbares Fachwissen gezielt analysiert und mit den qualitativen Untersuchungen der PMA-Lebensdauer in Kontext gesetzt. Darauf aufbauend wird im weiteren Verlauf, in Kombination mit dem ersten qualitativen Lebensdauermodell, eine zweite Testreihe geplant und durchgeführt, welche in einem quantitativen Lebensdauermodell mündet.

5.5.1 Fehlermechanismen

Wie in Kapitel 2.3 bereits beschrieben wurde, reichen die Untersuchungen zu den PoF von PMA und PMC zurück in die 1980er Jahre. Im Wesentlichen wird von den meisten Autoren einer von zwei möglichen Mechanismen als Ursache für die Zunahme des Leckstroms in piezoelektrischen Materialien angenommen.

In [33, 36, 37, 80] wird vermutet, dass einsetzende Elektromigration für den Anstieg des Leckstroms und langfristig den Ausfall durch Kurzschluss verantwortlich ist. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass sich Ionen aus den inneren Elektroden, insbesondere bei Verwendung von Elektroden auf Silberbasis, in eingelagerter Feuchte lösen und sich entlang des elektrischen Feldes bewegen. Dies geschieht vorzugsweise entlang von Rissen, Fehlstellen oder Korngrenzen zu einer der benachbarten Kathoden. Dort scheiden sich diese Ionen ab und bilden entlang ihres Weges mit der Zeit Dendriten, kleine gerichtete Verästelungen elektrisch leitfähigen Materials. Durch diesen Prozess wird mittel- und langfristig der effektive Abstand zwischen Kathode und Anode reduziert, wodurch die effektive Feldstärke lokal ansteigt, was sich in einem Anstieg des Leckstroms widerspiegelt [36].

Setzt sich der Prozess zunehmend fort unterschreitet der Abstand zwischen einer Anode und einem der Dendriten einen kritischen Grenzwert, so dass die Durchschlagsfestigkeit der Keramik überschritten wird. In Folge eines elektrischen Durchschlags wird das keramische Material um die Durchschlagstelle herum zerstört und die metallischen Komponenten (z. B. Blei und Titan) lagern sich um die Durchschlagstelle herum ab, so dass mindestens zwei benachbarte innere Elektroden kurzgeschlossen werden. Der PMA fällt hierdurch endgültig aus.

Als zweite wesentliche Ursache für Leckströme in piezoelektrischen Materialien wird die Migration von Sauerstofflückenstellen diskutiert [28]. Bei Sauerstofflückenstellen handelt es sich um Punktdefekte, die während des Herstellungsprozesses der Keramik entstehen und generell als verantwort-

lich für Schädigungen von ferroelektrischen Werkstoffen gelten [81]. Als Ursachen hierfür kommen Einlagerungen von Luftsauerstoff oder das Verdampfen von Blei während des Sinterprozesses [42] in Frage. Ähnlich wie bei der zuvor angesprochenen Elektromigration sind auch diese Punktdefekte mobil und bewegen sich entlang des elektrischen Feldes durch ihre positive Ladung von der Anode zur Kathode, wo sie ebenfalls Dendriten bilden können. An der Kathode nehmen die Ionen Elektroden von der Kathode auf, während an der Anode zusätzliche Sauerstoffleerstellen durch den Entzug von Elektronen an vorhandenen Sauerstoffatomen erzeugt werden [28].

Neben diesen beiden in der Literatur häufig zu findenden Mechanismen werden vereinzelt zwei weitere Mechanismen mit dem Ausfall von piezoelektrischen Materialien in Verbindung gebracht. So beschreiben Waser und Al-Shareef zusätzlich den Poole-Frenkel-Effekt, bei dem Elektronen unter bestimmten Bedingungen spontan von einem stabilen Zustand ins Leitungsband wechseln können und anschließend für kurze Zeit innerhalb des Isolators mobil sind, ehe sie wieder in einem stabilen Zustand „gefangen“ werden. Hohe elektrische Felder, wie sie z. B. an den Korngrenzen innerhalb des keramischen Materials auftreten können, begünstigen diesen Effekt [28, 31].

Van den Ende [80] vermutet neben dem bereits besprochenen Effekt der Elektromigration einen Elektrolyseprozess als Beschleuniger der Degradationsprozesse von PMA. Eindringende Feuchte wird im Inneren des PMAs durch die hohen elektrischen Felder in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt. Die dabei entstehenden Drücke im Inneren des PMAs führen zu Rissbildungen, welche die Einlagerung von zusätzlicher Feuchte begünstigen, so dass sich dieser Prozess bis zum endgültigen Versagen fortsetzt.

Nagata als auch Melnick vermuten, dass die beiden zuerst diskutierten Mechanismen, Elektromigration und Sauerstoffleerstellenmigration, anteilig am Versagen von piezoelektrischen Materialien (Melnick) oder PMA (Nagata) beteiligt sind [34, 29].

Basierend auf einem Vergleich der Ergebnisse der Vortests mit den Ergebnissen der zuvor dargestellten Arbeiten, kann im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass die betrachteten PMA entweder durch Migration von Sauerstoffleerstellen oder durch Elektromigration degradieren. Beide Mechanismen wurden bereits vielfältig untersucht und Berechnungsmodelle, die den zeitlichen Verlauf in Abhängigkeit bestimmter Einflussparameter berücksichtigen, aufgestellt. Da es sich in beiden Fällen um chemische Reaktionen handelt, wurde häufig die Arrhenius-Funktion als Grundlage für solche Berechnungen herangezogen [34].

5.5.2 Einflussparameter

5.5.2.1 Temperatureinfluss

Da bisher keine Ergebnisse publiziert wurden, die zweifelsfrei einen der beiden Mechanismen, Elektromigration oder Sauerstoffleerstellenmigration, ausschließen, wird im weiteren Verlauf davon ausgegangen, dass beide Mechanismen am Degradationsprozess beteiligt sind. Diese Vermutung wird unter anderem von Nagata geteilt [34]. Wesentlich für den Anwender ist jedoch nicht,

welcher der beiden Mechanismen letztlich zum Ausfall führt, sondern, in welchem Zusammenhang der spätere Ausfall mit verschiedenen Einflussparametern steht. Hierbei fällt auf, dass für beide Ausfallmechanismen die Temperaturabhängigkeit in Form einer Arrhenius-Funktion beschrieben werden kann. Somit gilt, wie u. a. von [31, 36] berichtet, ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Lebensdauer und der absoluten Temperatur eines PMAs im Betrieb.

5.5.2.2 Einfluss des elektrischen Feldes

Parallel zum Einfluss der Temperatur wurde in diversen Arbeiten [9, 26, 28, 30, 31] auch der Einfluss der elektrischen Feldstärke auf das Degradationsverhalten von PMA und PMC untersucht. In allen genannten Arbeiten wird übereinstimmend ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Lebensdauer und dem Logarithmus des elektrischen Feldes oder der elektrischen Spannung, die an der Probe anliegt, gezeigt. Lediglich Pertsch ermittelte in experimentellen Tests, dass der Zusammenhang zwischen Lebensdauer und elektrischer Gleichfeldstärke sich mit Hilfe einer Potenzfunktion beschreiben lässt [12].

Dieser logarithmische Zusammenhang gilt der Mehrzahl der Quellen nach sowohl für elektrische Gleichfelder als auch für Wechselfelder, wobei keine generelle Aussage darüber getroffen werden kann, welche der beiden Belastungen absolut betrachtet längere Lebensdauern ermöglicht. Nagata [34] untersuchte unter anderem den Einfluss von elektrischen Gleich- und Wechselfeldern unterschiedlicher Stärke auf das Degradationsverhalten von PMA und zeigte, dass bei Feldstärken von $E < 3,75 \text{ kV/mm}$ die Lebensdauer von PMA, die mit einem elektrischen Wechselfeld betrieben wurden, im Mittel bis zu einer Größenordnung höher war als die Lebensdauer von PMA gleicher Bauart unter Gleichfeldbelastung gleicher Stärke. Bei elektrischen Feldstärken von $E > 5,5 \text{ kV/mm}$ kehrte sich dieser Zusammenhang jedoch um. Eine mögliche Ursache für dieses Phänomen wird von Nagata nicht genannt. Van den Ende [80] beschreibt eine Wechselwirkung zwischen mechanischer und elektrischer Degradation, die die von Nagata [34] beobachteten Zusammenhänge möglicherweise erklären kann. Nach van den Ende wird durch Mikrorisse die schädigende Wirkung von Umgebungsfeuchte beschleunigt, da diese durch die Risse verstärkt in den PMA eindringen kann. Die eindringende Feuchte wiederum begünstigt das Risswachstum durch Elektrolysevorgänge, die zu erhöhten Partialdrücken im Inneren der Keramik führen, welche ihrerseits wiederum Zugspannungen in der Keramik hervorrufen, welchen das Material nur eine geringe Zugfestigkeit entgegensetzen kann.

Da Mikrorisse erst beim Überschreiten bestimmter material- und designabhängiger mechanischer Spannungen entstehen, ist es denkbar, dass beim Überschreiten der dazugehörigen Feldstärke über den Umweg der Mikrorissbildung und Feuchteeinlagerung der eigentliche Degradationsmechanismus beschleunigt abläuft und die Lebensdauern derart belasteter Aktoren unter der Lebensdauer eines vergleichbaren Aktors bei statischer Belastung liegen. Da von Nagata nur ungenaue Angaben zum Design und der Komposition der verwendeten PMA gemacht werden, können diese Daten nur qualitativ genutzt werden [34].

5.5.2.3 Einfluss der Feuchte:

Dem Einfluss von Feuchtigkeit auf die Lebensdauer von PMA wurde erst spät, gegen Ende der 1990er Jahre, Beachtung geschenkt. So zeigte Nagata [34], dass PMA, welche unter feuchten Bedingungen ($H = 80 \% r. H.$) betrieben werden, eine um zwei bis drei Dekaden geringere Lebensdauer erreichen als PMA in trockener Umgebung ($H = 10 \% r. H.$). Weiter konnte gezeigt werden, dass es eine starke Wechselwirkung zwischen elektrischer Feldstärke und Luftfeuchtigkeit in Bezug auf die PMA-Lebensdauer gibt, wobei mit zunehmender Feldstärke die Lebensdauer stark abnimmt und der Einfluss der Feuchte selbst noch verstärkt wird. Andersen [35] und Pertsch [12, 36] untersuchten systematisch den Feuchteeinfluss, insbesondere im elektrischem Gleichfeld. Ein elektrisches Gleichfeld zieht polare Wassermoleküle aus der Umgebungsfeuchte besonders stark an. Diese Wassermoleküle dringen daraufhin vermehrt in den PMA ein [4] und lösen einen der diskutierten Degradationsmechanismen aus. Pertsch untersuchte über 1000 PMA gleicher Bauart unter verschiedenen Umgebungs- und elektrischen Lastbedingungen und konnte zeigen, dass der Zusammenhang zwischen Lebensdauer des PMAs und der Umgebungsfeuchte ebenfalls gut mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann [12].

5.5.3 Zusammenfassung der Analyse des Fachwissens

Alle drei genannten Faktoren, Temperatur, elektrische Anregung sowie Umgebungsfeuchte, haben erkennbaren Einfluss auf die Lebensdauer von PMA. Eine qualitative Bewertung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Qualitative Bewertung der Einflüsse auf die PMA-Lebensdauer

Einflussfaktor	Dominanz	Beschreibung mittels	Quellen
Feuchte	++	Exponentialfunktion	[36]
Temperatur	+	Arrheniusfunktion (Exponentialfunktion)	[34, 35, 36]
Elektrische Anregung	-	Potenzfunktion (Gleichstromanteil)	[36]

Die Fehlermechanismen sind auf chemische Prozesse zurückzuführen. Hieraus folgt, dass sowohl der Einfluss der Temperatur als auch der Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Lebensdauer mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschrieben werden kann. Der Einfluss eines elektrischen Gleichfeldes kann mittels Potenzfunktion beschrieben werden, wobei derzeit noch nicht bekannt ist, wie sich die unterschiedlichen Einflüsse von Offset und Amplitude des elektrischen Signals gezielt abbilden lassen. Da in adaptronischen Anwendungen in der Regel eine Kombination von elektrischem Offset mit einer zeitlich variablen Amplitude verwendet wird, ist der Einfluss des elektrischen Feldes anwendungsabhängig und derzeit nur durch direkte experimentelle Analysen zu bestimmen.

Zwar belegen die Ergebnisse der Vortests und auch die Recherche von Fachliteratur zweifelsfrei, dass die elektrische Anregung einen Einfluss auf die zu erwartende PMA-Lebensdauer hat, jedoch

ist dieser Einfluss weniger dominant als jener der beiden anderen Faktoren. Daher sollen im weiteren Verlauf dieser Arbeit die dominanten Einflussfaktoren Umgebungsfeuchte und Temperatur vorrangig untersucht und ihr Einfluss auf die PMA-Lebensdauer quantifiziert werden.

5.6 Haupttests

Basierend auf dem qualitativen Lebensdauermodell und der Analyse des Fachwissens sowie der Vortests wird eine Reihe von experimentellen Untersuchungen geplant und durchgeführt, die die Zusammenhänge zwischen der PMA-Lebensdauer und den beiden dominanten Einflussparametern relative Feuchte und Temperatur quantitativ erfassen soll. Entgegen den Vortests wird daher nur noch eine elektrische Signalform untersucht ($U_{(t)} = 75 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$), die typischen adaptronischen Anwendungen nachempfunden ist. Weiter wird das betrachtete Intervall der relativen Feuchte auf Werte zwischen 40 % und 70 % reduziert, um einerseits ausreichend lange Lebensdauern während der Messungen bei hoher Feuchte zu erreichen, andererseits die zu erwartenden Testdauern bei niedrigen Feuchten nicht zu lange zu gestalten. Als Kriterium zur Bestimmung der Lebensdauer wird wieder ein Leckstrom von $I_L = 4 \text{ mA}$ definiert. Innerhalb des neuen Parameterbereiches werden die jeweiligen Feuchte- und Temperaturkombinationen zufällig gewählt, da davon ausgegangen wird, dass innerhalb des betrachteten Klimabereichs keine Änderung des Ausfallmechanismus auftreten wird. Die vier Randpunkte des Klimabereichs werden gezielt als Datenpunkte ausgewählt. Durch die zufällige Auswahl aller weiteren Messpunkte kommt es dazu, dass an einigen Datenpunkten mehrere unabhängige Messungen durchgeführt werden. Dies erlaubt einen ersten Blick auf Unterschiede der PMA-Lebensdauern aufgrund von Streuungen, die beispielsweise während der Herstellung entstehen können.

5.6.1 Quantitative Ergebnisse der Haupttests

Insgesamt werden im Rahmen der Haupttests 21 PMA getestet, die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Haupttests. Jeweils dargestellt die Logarithmen der Lebensdauern in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen bei Messung i.

i	H / T	Λ_i	i	H / T	Λ_i	i	H / T	Λ_i
1	40 % / 20 °C	7	8	60 % / 70 °C	2,8	15	70 % / 50 °C	1,7
2	40 % / 50 °C	5,7	9	60 % / 80 °C	2,5	16	70 % / 50 °C	1,7
3	40 % / 50 °C	5,4	10	60 % / 80 °C	3,2	17	70 % / 50 °C	1,4
4	40 % / 80 °C	4,6	11	70 % / 20 °C	4,3	18	70 % / 70 °C	0,7
5	40 % / 80 °C	4,8	12	70 % / 40 °C	3,2	19	70 % / 70 °C	2,3
6	40 % / 80 °C	4,3	13	70 % / 40 °C	2,8	20	70 % / 70 °C	1,9
7	50 % / 60 °C	4,4	14	70 % / 40 °C	2,8	21	70 % / 80 °C	0,9

5.6.2 Reproduzierbarkeit einzelner Messergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse von drei Datenpunkten, an denen jeweils mehrere Messungen durchgeführt wurden, dargestellt, um Schwankungen aufgrund statistischer Effekte zu illustrieren.

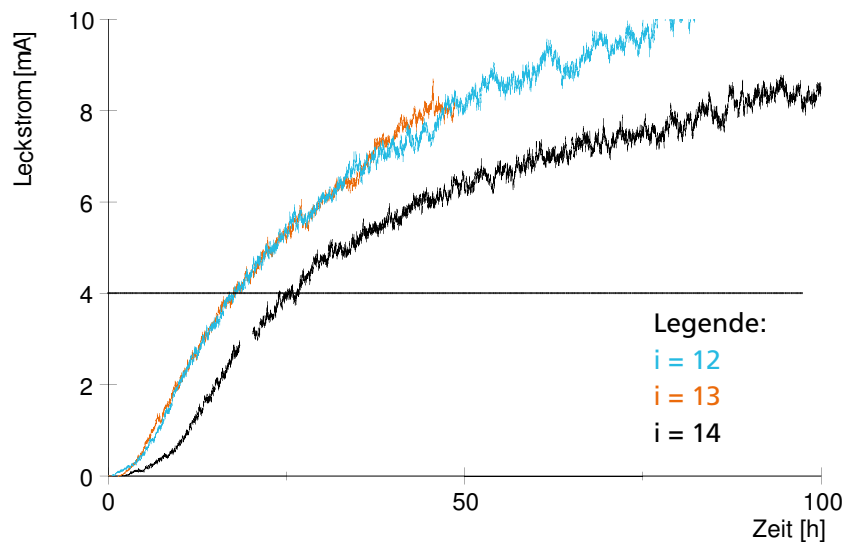


Bild 30: Ergebnisse quantitativer Tests (3); Vergleich dreier Messkurven, die bei 70 % r. H. und 40 °C aufgenommen wurden.

In Bild 30 sind drei Messkurven dargestellt, die bei $H = 70 \% r.H.$ und $T = 40 ^\circ C$ aufgenommen wurden. Man erkennt, dass zwei der Kurven (blau und orange) nahezu deckungsgleich sind. Der zeitliche Verlauf dieser beiden Messkurven ist nahezu identisch. Die dritte Kurve jedoch (schwarz) zeigt eine später einsetzende Zunahme des Leckstroms und einen insgesamt etwas flacheren Verlauf, so dass die erzielte Lebensdauer mit ca. $L_{i=12} = 25 h$ um rund 30 % höher liegt als bei den erstgenannten Aktoren ($L_{i=13} = L_{i=14} = 17 h$).

Bild 31 zeigt den Leckstromverlauf dreier Messungen, die bei $H = 70 \% r.H.$ und $T = 70 ^\circ C$ aufgenommen wurden. Erwartungsgemäß sind die Lebensdauern deutlich niedriger als die der Aktoren in Bild 30. Zusätzlich fällt jedoch auf, dass die Lebensdauern dieser drei Aktoren auch untereinander stärker abweichen und dass sich darüber hinaus die Charakteristika der jeweiligen Leckströme teilweise deutlich unterscheiden.

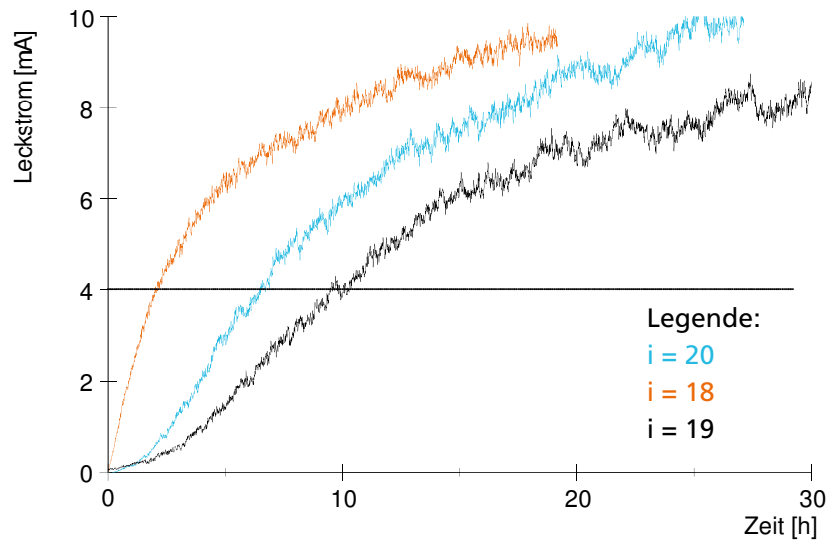


Bild 31: Ergebnisse quantitativer Tests (2); Vergleich dreier Messkurven bei 70 % r. H. und 70 °C, deutliche Abweichungen aller drei Messkurven zueinander.

Deutliche Unterschiede in den erzielten Lebensdauern zeigen auch die drei Messkurven, die bei $H = 40 \% r.H.$ und $T = 80\text{ °C}$ aufgenommen wurden, Bild 32. Die Lebensdauern erreichen Werte von $L_{i=4} = 42\text{ h}$ (orange), $L_{i=6} = 72\text{ h}$ (blau) und $L_{i=5} = 117\text{ h}$ (schwarz). Auch der Zeitpunkt der ersten Zunahme des Leckstroms variiert deutlich.

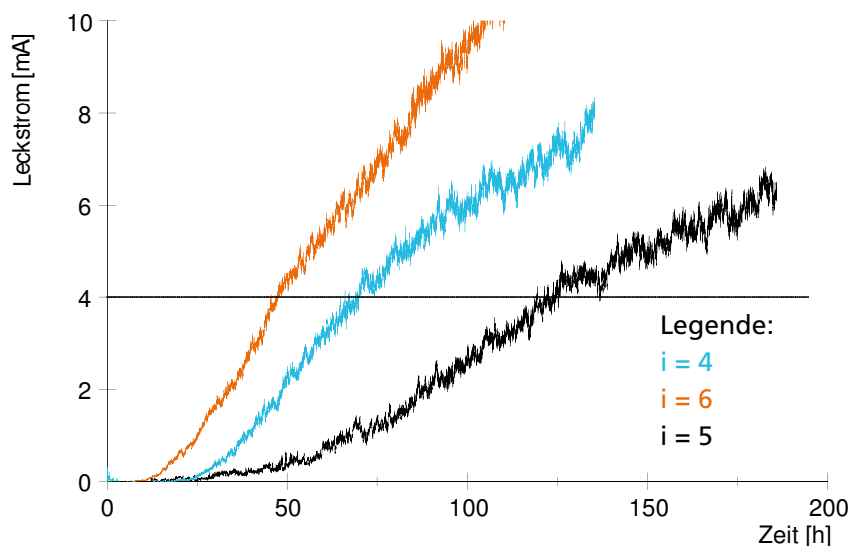


Bild 32: Ergebnisse quantitativer Tests (3); Vergleich dreier Messungen bei 40 % r. H. und 80 °C.

5.6.3 Zwischenfazit der Haupttests

Der zeitliche Verlauf der Leckstromzunahme der getesteten PMA ist qualitativ stets ähnlich, jedoch treten deutliche Streuungen der absoluten Lebensdauern auf. Diese wurden selbst dann festgestellt, wenn die Testbedingungen identisch waren. Dies deutet auf Streuungen der PMA hinsichtlich ihrer Belastbarkeit hin. Ob diese Streuungen ihre Ursache in Ungenauigkeiten während des

Herstellungsprozesses haben oder systemimmanent für PMA sind, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Im Extremfall wurde unter identischen Testbedingungen für den belastbarsten PMA eine um den Faktor 3 höhere Zeitspanne bis zum Erreichen des kritischen Leckstroms ($I_L = 4 \text{ mA}$) beobachtet als für den PMA mit der niedrigsten Belastbarkeit.

5.7 Quantitatives Lebensdauermodell

Aufbauend auf dem qualitativen Modell aus Kapitel 5.4 kann nun mit den Ergebnissen der Haupttests und geeigneter mathematischer Beschreibungen ein quantitatives Lebensdauermodell erzeugt werden. Hierzu sollen zunächst nur die mathematisch einfachsten Methoden angewendet werden, ehe im Rahmen der Verifizierung auch Alternativen erörtert und mit den Ergebnissen des quantitativen Lebensdauermodells verglichen werden.

Da die Stichprobengröße begrenzt ist und Streuung beobachtet wurde, liegt der Fokus dieses Kapitels in einer mathematisch einfachen Beschreibung des zeitlichen Ausfallverhaltens der PMA unter klimatischen Einflüssen. Hierzu wird zunächst mittels linearer Interpolation im betrachteten Parameterbereich die mittlere PMA-Lebensdauer Λ in Abhängigkeit der Einflussfaktoren geschätzt, ehe im nächsten Schritt durch eine Weibullanalyse das zeitliche Ausfallverhalten, welches als über den gesamten Parameterbereich konstant angenommen wird, beschrieben wird. Die Vertrauensbereiche, ein weiteres Ergebnis der Weibullverteilung, ermöglichen eine Bewertung der Aussagewahrscheinlichkeit.

5.7.1 Bestimmung der mittleren Lebensdauer Λ

Zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer durch lineare Interpolation eignen sich zwei Vorgehensweisen, die gleichwertig sind und dieselben Ergebnisse liefern.

Die im Folgenden als *grafische* Lösung bezeichnete Vorgehensweise basiert auf einem konsekutiven Vorgehen, bei dem nacheinander die Einflüsse der einzelnen Einflussparameter und der Wechselwirkungen bestimmt werden. Die einzelnen Teilschritte können grafisch dargestellt werden, wodurch gänzlich auf EDV verzichtet werden kann.

Die analytische Lösung basiert auf einem Gleichungssystem, welches die linearen Zusammenhänge und die Wechselwirkungen der Einflussparameter auf die PMA-Lebensdauer direkt beschreibt. Mithilfe dieses Verfahrens können, insbesondere unter Zuhilfenahme von EDV, auch Zusammenhänge beschrieben werden, die Interpolationen höherer Ordnung oder eine größere Anzahl von zu berücksichtigenden Einflussparametern und daraus resultierender Wechselwirkungen berücksichtigen.

Für beide Vorgehensweisen zur Bestimmung der mittleren Lebensdauern müssen Referenzwerte definiert werden, auf denen das spätere Lebensdauermodell basiert. Diese *Ankerpunkte* (J_i) markieren die Grenzen des späteren Lebensdauermodells (Bild 33). Zwischen diesen wird im Rahmen

der Modellbildung interpoliert bzw. die jeweiligen Datensätze zur Erstellung des linearen Gleichungssystems verwendet.

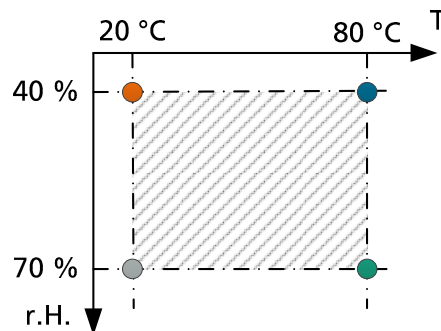


Bild 33: Gültigkeitsbereich des späteren PMA-Lebensdauermodells und Ankerpunkte

Aus den Messwerten, die während der Haupttests gewonnen wurden, bieten sich vier Datenpunkte als Ankerpunkte an. Da an einem dieser Datenpunkte mehrere Messungen durchgeführt wurden, wird für die resultierenden Ankerpunkte (J_3) der arithmetische Mittelwert der logarithmierten Lebensdauern festgelegt. Die endgültigen Ankerpunkte können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Klimatische Bedingungen, Quelle und Λ -Wert der vier Ankerpunkte j

J_i	H	T	Quelle (Tabelle 6, i)	Λ
1	40 %	20 °C	1	7
2	40 %	80 °C	4, 5, 6	4,5
3	70 %	20 °C	11	4,3
4	70 %	80 °C	21	0,9

5.7.2 Annahmen als Grundlagen des quantitativen Lebensdauermodells

Für das resultierende Lebensdauermodell gelten unabhängig vom eingeschlagenen Lösungsweg die folgenden drei Grundannahmen A1 bis A3. Diese wurden aufgrund von Plausibilitätsbetrachtungen getroffen:

- A1. Innerhalb des betrachteten Parameterbereichs (relative Feuchte / Temperatur) sind die Fehlermechanismen (PoF) gleich und deren zeitliche Verlauf qualitativ stets ähnlich.
- A2. Der Zusammenhang zwischen Einflussparametern (r. H. / Temperatur) kann mit Hilfe einer stetigen und stetig differenzierbaren Funktion beschrieben werden.
- A3. In Folge von 1. und 2. ist es möglich, im Rahmen des zu betrachtenden Parameterbereiches durch Interpolation auf Werte zwischen bekannten Datenpunkten zu schließen.

5.7.3 Grafische Bestimmung der mittleren Lebensdauern Λ

Ausgehend von den vier Ankerpunkten aus Tabelle 7 werden zunächst zwei Geraden gesucht, welche den Zusammenhang zwischen Temperatur und logarithmierter Lebensdauer Λ für eine relative Feuchte von 40 % bzw. 70 % widerspiegeln.

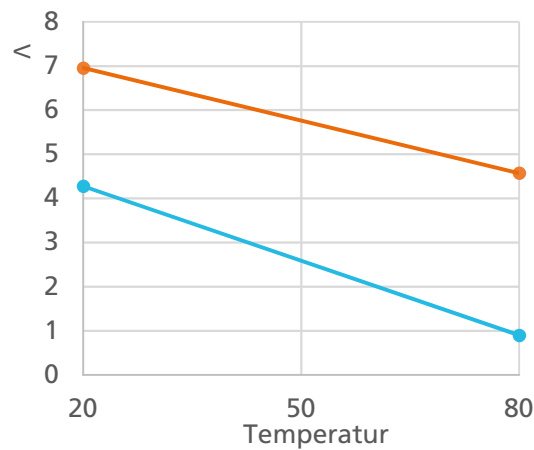


Bild 34: grafische Darstellung der Ankerpunkte und der entsprechenden linearen Regressionsgeraden für 40 % r. H. (blau) und 70 % r. H. (orange).

Bild 34 zeigt diese Geraden. Sie sind definiert durch:

$$\Lambda_{40\%} = -0,0417 T/^{\circ}\text{C} + 7,78 \quad (5.8)$$

$$\Lambda_{70\%} = -0,0567 T/^{\circ}\text{C} + 5,1 \quad (5.9)$$

Aufbauend aus den hieraus resultierenden Λ -Werten für verschiedene Temperaturen bei 40 % bzw. 70 % r. H., kann nun mittels linearer Interpolation zwischen Paaren korrespondierender Λ -Werten für einen beliebigen Temperaturwert zwischen 20 °C und 80 °C der Zusammenhang zwischen r. H. und dem Logarithmus der Lebensdauer geschätzt werden.

Tabelle 8: Λ' -Werte für verschiedene klimatische Bedingungen durch Kombination von linearer Regression und anschließender linearer Interpolation.

		Feuchte (% r. H.)			
		40	50	60	70
Temperatur (°C)	20	7,0	6,1	5,2	4,3
	30	6,5	5,6	4,7	3,7
	40	6,1	5,1	4,1	3,2
	50	5,7	4,7	3,6	2,6
	60	5,3	4,2	3,1	2,0
	70	4,9	3,8	2,6	1,5
	80	4,5	3,3	2,1	0,9

Tabelle 8 gibt die so ermittelten Λ' -Werte für eine Vielzahl möglicher klimatischer Bedingungen an, während Bild 35 diese grafisch über der Temperatur für verschiedene Werte von r. H. darstellt.

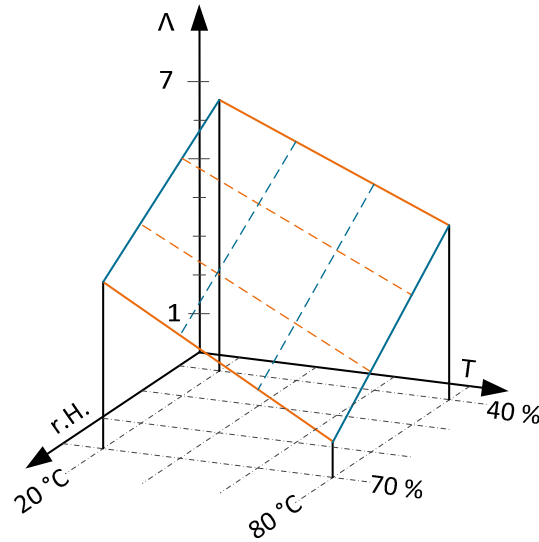


Bild 35: Grafische Darstellung der Λ -Werte des linearen Modells (Tabelle 8)

5.7.4 Analytisch Bestimmung der mittleren Lebensdauern Λ

Das qualitative Lebensdauermodell besagt, dass sich die PMA-Lebensdauer allgemein durch die beiden Terme 5.6 und 5.7 beschreiben lässt. Zur Bestimmung der Faktoren C_1 bis C_4 wird ein lineares Gleichungssystem basierend auf vier beliebigen bekannten Datenpunkten erzeugt und gelöst. Eine geeignete Basis für dieses Gleichungssystem stellen z. B. die Eckpunkte des in den Haupttests vermessenen Parameterbereichs und damit die Ankerpunkte (Tabelle 7) dar.

Das Gleichungssystem berücksichtigt neben den direkten Effekten auch die Wechselwirkung der beiden Einflussparameter sowie eine notwendige Konstante, woraus die insgesamt vier unbekannten Faktoren C_1 bis C_4 resultieren. Es gilt allgemein:

$$[A] \times [C] = [\Lambda] \quad (5.10)$$

Worin $[A]$ im vorliegenden Falle eine 4×4 -Matrix beschreibt, die die klimatischen Bedingungen der Ankerpunkte angibt, $[C]$ den Vektor der Einflussparameter C_1 bis C_4 und $[\Lambda]$ den Ergebnisvektor darstellt. Die entsprechenden Werte der den Ankerpunkten zugehörigen Temperaturen, relativen Feuchten und Λ -Werte lassen sich Tabelle 7 entnehmen.

$$[A] = \begin{bmatrix} T_1 & H_1 & T_1 \cdot H_1 & 1 \\ T_2 & H_2 & T_2 \cdot H_2 & 1 \\ T_3 & H_3 & T_3 \cdot H_3 & 1 \\ T_4 & H_4 & T_4 \cdot H_4 & 1 \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix}; [\Lambda] = \begin{bmatrix} \Lambda_{j=1} \\ \Lambda_{j=2} \\ \Lambda_{j=3} \\ \Lambda_{j=4} \end{bmatrix}$$

Die Lösung des Gleichungssystems erlaubt nun die allgemeine Beschreibung der mittleren PMA-Lebensdauer zu:

$$\Lambda_{H,T} = -\frac{0,08}{\%r.H.} \cdot H - \frac{0,0217}{^{\circ}C} \cdot T - \frac{0,0005}{\%r.H. \cdot ^{\circ}C} \cdot H \cdot T + 11,03 \quad (5.11)$$

5.7.5 Bestimmung des zeitlichen Ausfallverhaltens

Im Rahmen der Haupttests wurden alle Messwerte der experimentellen Untersuchungen bei zeitlich konstanten und klar definierten Belastungen erfasst. Dennoch fällt bei der Betrachtung der Messwerte auf, dass trotz konstanter Belastung an diversen Messpunkten Streuungen der erreichten Lebensdauern auftraten (vergl. Tabelle 6). Es ist daher notwendig, das zeitliche Ausfallverhalten der PMA unter klimatischen Bedingungen zu beschreiben. In Kapitel 3.1.2 wurde sowohl die Weibullanalyse, eine geeignete und verbreitete Methode zur Beschreibung des zeitlichen Ausfallverhaltens, als auch das SSI-Modell, eine Erklärung für das zeitlich variable Ausfallverhalten, grundlegend erläutert.

Da in den durchgeführten Untersuchungen die Belastungen (Temperatur, Feuchte) gezielt eingestellt und konstant gehalten wurden, bietet es sich an, entgegen dem SSI-Modell die Verteilungsfunktion der wirkenden Belastung auf den entsprechenden Erwartungswert zu reduzieren. Hierdurch kann der Fokus auf die Beschreibung der PMA-abhängigen Streuungen gelegt werden.

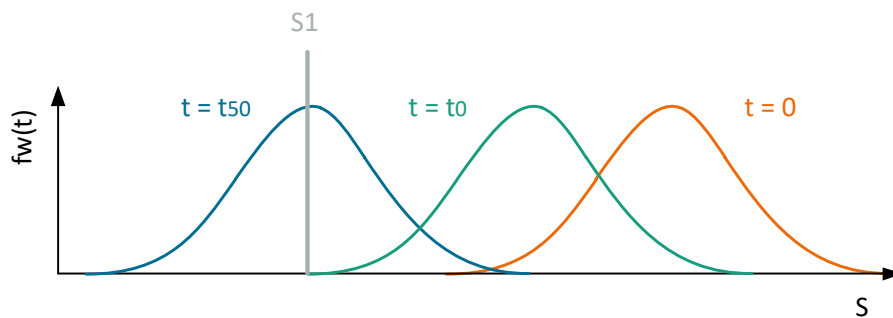


Bild 36: SSI mit idealisiertem Stress zu verschiedenen Zeitpunkten.

Dieses Vorgehen lässt sich mit Hilfe des in Bild 36 dargestellten Zusammenhanges erklären. Entgegen dem klassischen SSI-Modell wird die Belastung nicht mehr als einer Verteilungsfunktion folgend, sondern als diskret angenommen und mit einer vertikalen grauen Linie dargestellt (S_1). Diese Vereinfachung ist im Falle einer kontinuierlich konstanten Belastung plausibel. Die Belastbarkeit entspricht weiter dem konventionellen SSI-Ansatz. Zum Zeitpunkt $t = 0$ schneidet die Belastung (S_1) die Belastbarkeit nicht (orange Kurve), es kommt in der Folge zu keinen Ausfällen. Mit zunehmender Zeit verschiebt sich die Belastbarkeit zu geringeren Werten, so dass es zum Zeitpunkt $t = t_0$ (grün) zur ersten Berührung der Belastbarkeit mit der Belastung, dem ersten Ausfall kommt. Mit zunehmender Zeit verschiebt sich die Belastbarkeit weiter und es kommt kontinuierlich zu Ausfällen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt $t > t_0$, entspricht hierbei dem Anteil der Verteilungsfunktion der Belastbarkeit, die links von der Belastung liegen. Folgt man der Annahme, dass sich das Ausfallverhalten der PMA durch eine 3-parametrische Weibullverteilung gut beschreiben lässt und diese über den gesamten betrachteten Parameterbereich gleich ist, wird die Ausfallwahrscheinlichkeit gemäß Formel 3.9 definiert. Wobei gilt:

$$T^* = f(H, T) \quad (5.12)$$

Können B und t_0 definiert werden, ist es weiter möglich, die charakteristische Lebensdauer T^* auf eine beliebige nominelle Lebensdauer t_x zu beziehen.

5.7.6 Bestimmung der Aussagewahrscheinlichkeit

Das zuvor ermittelte lineare Modell kann dazu genutzt werden, die zu erwartende mittlere PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der relativen Feuchte und Temperatur zu schätzen. Im nächsten Schritt soll das 90 %-Konfidenzintervall bestimmt werden. Dieses gibt an, in welchem Intervall die zu erwartende PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit von r. H. und Temperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % tatsächlich liegt.

Zwei Ursachen tragen dazu bei, dass das Ergebnis des linearen Modells nicht mit dem aus jeder Stichprobe gewonnenen übereinstimmt. Zum einen unterliegen die Lebensdauern der PMA unter gleichen Bedingungen einer natürlichen Streuung, welche sich durch ein zeitlich variables Ausfallverhalten äußert. Die Gründe hierfür – herstellungsabhängige und messtechnische Streuungen – wurden in Kapitel 3.1.2 grundlegend dargestellt. Zur Beschreibung dieses zeitlich variablen Ausfallverhaltens in Folge von Streuung innerhalb einer Stichprobe eignen sich verschiedene Verteilungsfunktionen wie z. B. die Weibull- oder die Log-Normalverteilung. Die zweite Ursache möglicher Abweichungen vom Ergebnis des PMA-Lebensdauermodells gegenüber einer Stichprobe liegt in den begrenzten Größen der untersuchten Stichprobe. Es gilt hierbei ganz allgemein, dass mit zunehmender Größe einer Stichprobe die Ähnlichkeit der resultierenden Verteilungsfunktion mit der Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit zunimmt. Im Umkehrschluss erlauben kleine Stichproben größere Abweichungen, sowohl zur Grundgesamtheit als auch zu anderen Stichproben der gleichen Grundgesamtheit.

Um die Genauigkeit, mit der das lineare PMA-Lebensdauermodell die Grundgesamtheit abbildet, zu quantifizieren, wird daher zunächst nach einer geeigneten Verteilungsfunktion gesucht und anschließend das 90 %-Konfidenzintervall bestimmt. Wie in Kapitel 3.1.2 dargestellt wurde, können mit einer Weibullverteilung sehr unterschiedliche Ausfallverhalten beschrieben werden. Sie eignet sich zum Beschreiben eines Ausfallverhaltens, dessen Charakteristik noch unbekannt ist. Dies hat dazu beigetragen, dass sich die Weibullverteilung in den vergangenen Jahrzehnten zur im Maschinenbau meist verwendeten Lebensdauer-Verteilung entwickelt hat [61].

Es wird eine Weibullanalyse der experimentell gewonnenen PMA-Lebensdauern durchgeführt, die neben der resultierenden Weibullverteilung auch das 90 %-Konfidenzintervall liefert. Hierzu wird auf die Software *Visual XSEL* in der Version 12 zurückgegriffen, welche es ermöglicht, die Aufbereitung und Analyse der Rohdaten eines Lebensdauerversuchs automatisiert durchzuführen.

5.7.7 Normieren der Messdaten

Eine Besonderheit gegenüber konventionellen Lebensdaueruntersuchungen mit Hilfe einer Weibullanalyse liegt im Falle der Haupttests darin, dass die experimentell ermittelten Lebensdauerwerte bei teilweise unterschiedlichen Belastungen. Es wurden also nicht alle PMA den gleichen

Belastungen, sondern unterschiedlichen Kombinationen von relativer Feuchte und Temperatur ausgesetzt. Zur Durchführung einer Weibullanalyse ist es daher notwendig, die ermittelten Daten auf eine gemeinsame Referenzbelastung zu beziehen und so eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu erreichen. Die Basis für diesen Schritt bildet das lineare PMA-Lebensdauermodell.

Vorangegangene Arbeiten [33, 34, 36] konnten zeigen, dass ein eindeutiger allgemeiner Zusammenhang zwischen PMA-Lebensdauer und wirkenden Einflussfaktoren hergestellt und darüber hinaus davon ausgegangen werden kann, dass die Fehlermechanismen innerhalb der jeweils betrachteten Parameterbereiche gleichbleiben.

Hierauf gründet der deduktive Schluss, dass der Zusammenhang zwischen einem Einflussfaktor und der mittleren PMA-Lebensdauer einer Stichprobe auch für jede einzelne Einheit dieser Stichprobe gelten muss. Dies erlaubt im Rahmen einer Plausibilitätsbetrachtung die Annahme, dass ein PMA, der unter gegebenen klimatischen Bedingungen eine im Verhältnis zur Grundgesamtheit aller PMA gewisse Lebensdauer erreicht, bei anderen klimatischen Bedingungen, unter der Voraussetzung, dass die Versagensmechanismen gleichbleiben, eine im Verhältnis zur Grundgesamtheit vergleichbare Lebensdauer erreichen würde. Allgemein formuliert lässt sich daher schließen, dass ein PMA, der in einem Experiment eine überdurchschnittliche Lebensdauer erreicht, unter allen klimatischen Bedingungen eine überdurchschnittliche Lebensdauer erreichen würde, während solche, die in einem Experiment besonders früh ausfallen, unter allen Bedingungen früh ausgefallen wären.

Mithilfe des linearen Modells kann bestimmt werden, welche PMA-Lebensdauer bei gegebenen klimatischen Bedingungen zu erwarten ist. Es können daher die zu erwartenden Lebensdauern an allen Datenpunkten der Haupttests bestimmt und mit den im Experiment erreichten Messwerten verglichen werden. Der Vergleich dieser Werte gibt Aufschluss darüber, ob es sich bei einer konkreten Probe um einen PMA mit über-, unter- oder durchschnittlicher Lebensdauer handelt.

Im nächsten Schritt werden die Verhältnisse der experimentell ermittelten Lebensdauern L und den entsprechenden Modellwerten L' ermittelt und auf eine synthetische Referenzbelastung bezogen, die die Grundlage für die anschließende Weibullanalyse bildet. Das Ergebnis sind Lebensdauerwerte L'' und deren Logarithmen Λ'' , die virtuell unter den gleichen klimatischen Bedingungen ermittelt wurden, so dass alle experimentell ermittelten PMA-Lebensdauern in einer einzigen Weibullanalyse ausgewertet werden können, auch wenn diese tatsächlich unter ungleichen Bedingungen ermittelt wurden. Die insgesamt 21 virtuellen Lebensdauerwerte sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Virtuelle Lebensdauer- und Λ -Werte zur Durchführung einer Weibullanalyse. Die Grundlage hierfür bilden die experimentell gewonnenen Lebensdauern der Haupttests (Tabelle 6).

k	L''_k	Λ''_k	k	L''_k	Λ''_k	k	L''_k	Λ''_k
1	50	3,9	8	57	4,1	15	21	3,0
2	46	3,9	9	71	4,3	16	21	3,0
3	35	3,6	10	148	5,0	17	15	3,8
4	49	4,0	11	50	3,9	18	24	3,1
5	61	4,2	12	54	3,9	19	112	4,7
6	36	3,7	13	36	3,5	20	81	4,3
7	58	4,1	14	36	3,5	21	51	3,9

Die sich anschließende Weibullanalyse wird automatisiert durchgeführt und folgt dem konventionellen Ablauf, wie er z.B. in [61] beschrieben wird. Zunächst werden die ermittelten virtuellen Lebensdauern nach ihrer Größe geordnet, wobei Messwerte gleicher Lebensdauer zu Gruppen zusammengefasst werden. Anschließend werden die Rangzahlen, die der Ausfallwahrscheinlichkeit entsprechen, bestimmt und eine entsprechende Regressionskurve ermittelt. Das Ergebnis in Form des Weibullplots und einiger charakteristische Größen ist in Bild 37 dargestellt.

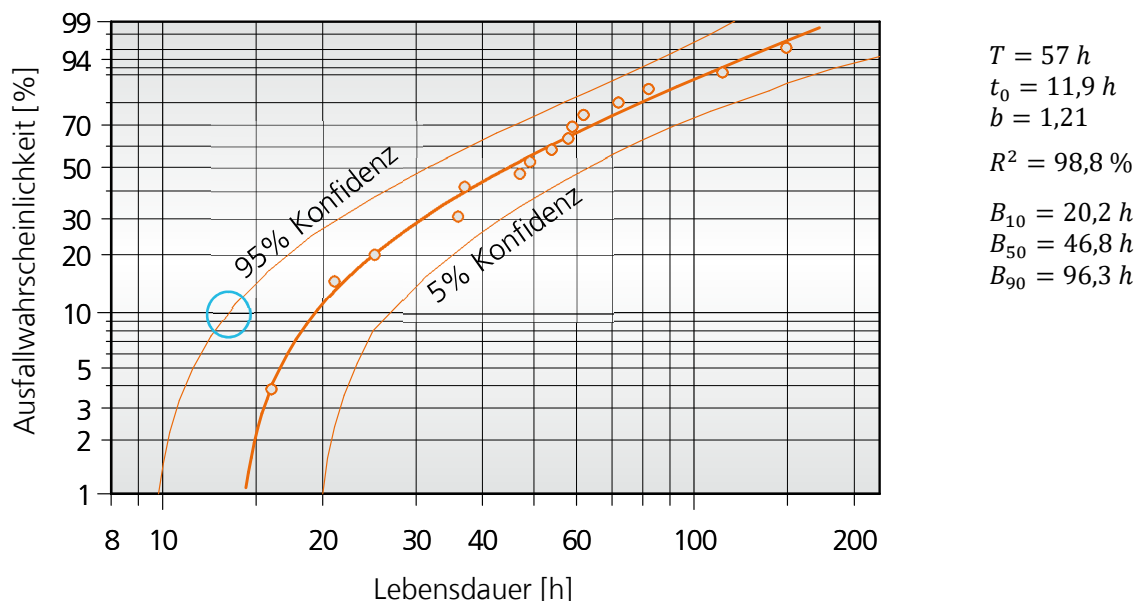


Bild 37: Weibullplot des quantitativen Lebensdauermodells mit 90% Konfidenzintervall und Markierung der 10% Ausfallwahrscheinlichkeit bei 95% Konfidenz

Man erkennt im Graphen insgesamt 15 Datenpunkte obwohl zuvor mehr Messwerte ermittelt wurden. Die Ursache hierfür liegt darin, dass einige Lebensdauerwerte mehrfach erreicht, diese aber nur einmal dargestellt wurden. Zur Bestimmung der Rangzahlen wurde diesem Umstand durch Gruppenbildung Rechnung getragen, so dass hierdurch das Ergebnis nicht verfälscht wurde. Am Verlauf der Weibullkurve lassen sich Werte wie z. B. die B_{50} Lebensdauer, die erwartete Median-Lebensdauer direkt ablesen. Er beträgt im vorliegenden Fall rund 47 Stunden und liegt damit leicht unterhalb dessen, was vor der Weibullanalyse erwartet wurde. Dieses Ergebnis lässt sich

derart deuten, dass das quantitative Lebensdauermodell die tatsächliche Lebensdauer der PMA geringfügig überschätzt.

Die charakteristische Lebensdauer beträgt rund 57 Stunden. Bei dieser Größe handelt es sich jedoch, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, lediglich um eine mathematische Größe zur Beschreibung des Verlaufs der Weibullkurve, ohne direkten Bezug zur durchschnittlichen PMA-Lebensdauer. Sie lässt sich jedoch derart interpretieren, dass nach 57 Stunden rund 13 von 21 getesteten PMA (63,2 %) ausgefallen wären.

Der Formparameter der Weibullverteilung beträgt rund 1,21. Dies deutet auf überwiegend Verschleiß- oder Degradations-bedingtes Ausfallverhalten hin und ist daher grundlegend plausibel.

Die beiden Kurven, die links bzw. rechts der Weibullkurve verlaufen geben die 5 %- und 95 %-Vertrauensbereiche an. Der Abstand dieser beiden Kurven zueinander ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Stichprobe zur Grundgesamtheit und damit der Stichprobengröße. Je näher die Kurven beieinanderliegen, desto geringer ist die potentielle Abweichung der vorliegenden Weibullverteilung zur Weibullverteilung einer Stichprobe unendlicher Größe. Mit zunehmender Stichprobengröße nimmt also der Abstand dieser Kurven ab. Als Ursache für solche Abweichungen kommen prinzipiell verschiedene Faktoren in Frage, die im folgenden Kapitel näher beleuchtet werden. Blau hervorgeheben ist der Schnittpunkt des 95% Konfidenzintervalls und der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t) = 10\%$. Dieser Punkt beschreibt, dass mit 95% Wahrscheinlichkeit 90% einer Stichprobe eine Lebensdauer größer des Lebensdauerwertes dieses Schnittpunktes aufweisen.

5.7.8 Zwischenfazit des quantitativen Lebensdauermodells

Das quantitative Lebensdauermodell kann zur Schätzung der mittleren PMA-Lebensdauer verwendet werden. Die Streuung der zu erwartenden PMA-Lebensdauern ist in erster Linie auf Unterschiede in der Belastbarkeit der einzelnen PMA zurückzuführen und weniger ein Resultat des geringen Stichprobenumfanges. Zur Steigerung der Modellgenauigkeit ist daher eine Erweiterung der quantitativen Datenbasis nicht zielführend, da durch eine Steigerung des Stichprobenumfanges die Genauigkeit des Lebensdauermodells nur geringfügig zunimmt. Das PMA-Lebensdauermodell überschätzt den tatsächlichen Erwartungswert geringfügig, so dass dies während der Verifizierung berücksichtigt werden muss.

Wird nach einem anderen Konfidenzintervall gesucht, z.B. 90% oder 99%, kann mit Hilfe der virtuellen Lebensdauern und im Rahmen einer erneuten Weibullanalyse die Lage eines solchen Konfidenzintervall bestimmt werden. Da die Breite eines Konfidenzinterfalls direkt auf die zugrundeliegende Stichprobengröße zurückgeht und eine analytische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen der Verteilungsfunktion und der Breite des Konfidenzintervalls nicht möglich ist, wird auf eine Darstellung verschiedener Vertrauensbereiche an dieser Stelle verzichtet.

5.8 Methodenvergleich

In Kapitel 5.7 wurde zu Gunsten eines geringen mathematischen Aufwandes bewusst auf Interpolations- und Regressionsverfahren höherer Ordnung verzichtet und eine Weibullverteilung zur Beschreibung der Ausfallcharakteristik verwendet.

Es werden im Folgenden drei mögliche Ansätze zur Optimierung des quantitativen Lebensdauermodells diskutiert und exemplarisch durchgeführt. Diese sind:

- Quadratische Interpolation zur Beschreibung des Temperatureinflusses
- Lineare Regression zur Minimierung der Summe der Fehlerquadrate aller Messwerte durch manuelle Anpassung der Ankerpunkte
- Beschreibung der Ausfallcharakteristik mittels Log-Normalverteilung

Wie weiter in Kapitel 5.7 gezeigt, überschätzt das lineare Lebensdauermodell die PMA-Lebensdauer im Durchschnitt um ca. 10 %. Der Korrelationskoeffizient der Weibullverteilung beträgt ca. 98 %. Im Folgenden wird daher das gewählte Vorgehen überprüft und verschiedene Methoden zur Optimierung des Lebensdauermodells verglichen, ehe dieses experimentell verifiziert wird. Als mögliche Ursachen für Ungenauigkeiten kommen, neben der natürlichen Streuung der PMA-Lastbarkeit während der experimentellen Untersuchungen, drei Szenarien in Betracht:

1. Der Zusammenhang zwischen einem der Einflussparameter und dem Logarithmus der Lebensdauer ist nicht exakt linear. Daher ist die lineare Interpolation nicht die optimale Regressionsmethode zur Erzeugung des PMA-Lebensdauermodells.
2. Die stark begrenzte Anzahl von experimentellen Werten führt insbesondere bei der Definition der Ankerpunkte zu großen Abweichungen im Vergleich zu den tatsächlichen Erwartungswerten. Hierdurch wird das auf den Ankerpunkten basierende Modell verfälscht und ist nicht in der Lage, die PMA-Lebensdauern einer größeren Stichprobe quantitativ richtig abzuschätzen.
3. Die Weibullverteilung, die die Streuung innerhalb der Stichprobe beschreibt, ist nicht die bestmögliche Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Ausfallverhaltens der PMA.

Im Folgenden sollen diese drei Punkte untersucht und exemplarisch alternative Lebensdauermodelle für PMA erzeugt und anschließend jeweils mit dem quantitativen Lebensdauermodell verglichen werden.

5.8.1 Quadratische Interpolation zur Beschreibung des Temperatureinflusses

Zur Erzeugung des quantitativen Lebensdauermodells wurden zunächst vier Ankerpunkte an den Eckpunkten des Gültigkeitsbereichs des betrachteten Parameterbereichs definiert und zwischen diesen linear interpoliert bzw. ein auf den Ankerpunkten basierendes lineares Gleichungssystem gelöst.

Im Folgenden wird überprüft, ob durch Anwendung eines Regressionsverfahrens höherer Ordnung die Qualität des Lebensdauermodells verbessert werden kann. Hierzu wird der betrachtete Temperaturbereich von $T = 20\text{ °C}$ bis $T = 80\text{ °C}$ in zwei gleich große Bereiche unterteilt und an der sich ergebenden Grenze von $T = 50\text{ °C}$ werden zwei zusätzliche Ankerpunkte definiert. Die resultierenden Ankerpunkte J_q sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Sechs Ankerpunkte zur quadratischen Interpolation

J_q	H	T	Quelle (Tabelle 6, i)	Λ_q
1	40 %	20 °C	1	7
2	40 %	50 °C	2, 3	5,6
3	40 %	80 °C	4, 5, 6	4,5
4	70 %	20 °C	11	4,3
5	70 %	50 °C	15, 16, 17	1,6
6	70 %	80 °C	21	0,9

Die so ermittelten sechs Ankerpunkte erlauben prinzipiell drei verschiedene Arten der Interpolation.

1. Lineare Interpolation über der Feuchte und lineare Regression über Temperatur
2. Lineare Interpolation über der Feuchte, stückweise lineare Interpolation über Temperatur
3. Lineare Interpolation über der Feuchte, quadratische Interpolation über Temperatur

Das quantitative Lebensdauermodell wurde mittels linearer Interpolation erstellt. Dieses Vorgehen stellt die einfachste und damit zunächst naheliegende Variante dar und entspricht der ersten aufgeführten Möglichkeit.

Die stückweise lineare Interpolation widerspricht einer in Kapitel 5.7.2 formulierten Grundannahme des quantitativen Lebensdauermodells, da diese, zu zwei voneinander unabhängigen Modellen führen würde, welche jeweils einen von zwei Temperaturbereichen beschreiben würden. Zwar würden beide Modelle bei einer Temperatur von $T = 50\text{ °C}$, der Schnittlinie der beiden Modelle, für jeden Wert r H. den gleichen Funktionswert und damit die gleiche Lebensdauer aufweisen, wären jedoch nicht stetig differenzierbar. Daher ist dieses Verfahren ungeeignet.

Die quadratische Interpolation erzeugt einerseits einen höheren mathematischen Aufwand, erlaubt aber eventuell eine genauere Beschreibung des PMA-Ausfallverhaltens und wird daher im Folgenden untersucht und die Ergebnisse mit denen des quantitativen Modells verglichen.

Die Modellbildung erfolgt analog zur Erstellung des grafischen Vorgehens im Falle des linearen Lebensdauermodells. Die quadratische Interpolation liefert eine Schar von quadratischen Funktionen. Die Grenzkurven bei 40 % respektive 70 % r. H. ergeben sich zu:

$$40 \% \text{ r. H. (orange):} \quad L_{q,40\%} = \frac{0,0002}{(^{\circ}\text{C})^2} T^2 - \frac{0,06}{^{\circ}\text{C}} T + 8,1 \quad (5.13)$$

$$70 \% \text{ r. H. (blau):} \quad L_{q,70\%} = \frac{0,0011}{(^{\circ}\text{C})^2} T^2 - \frac{0,17}{^{\circ}\text{C}} T + 7,2 \quad (5.14)$$

Die Bild 38a und b zeigen den Unterschied zwischen linearer Interpolation auf Basis der vier Ankerpunkte aus Kapitel 5.7.1 und der quadratischen Interpolation unter Verwendung der nun insgesamt sechs Ankerpunkte.

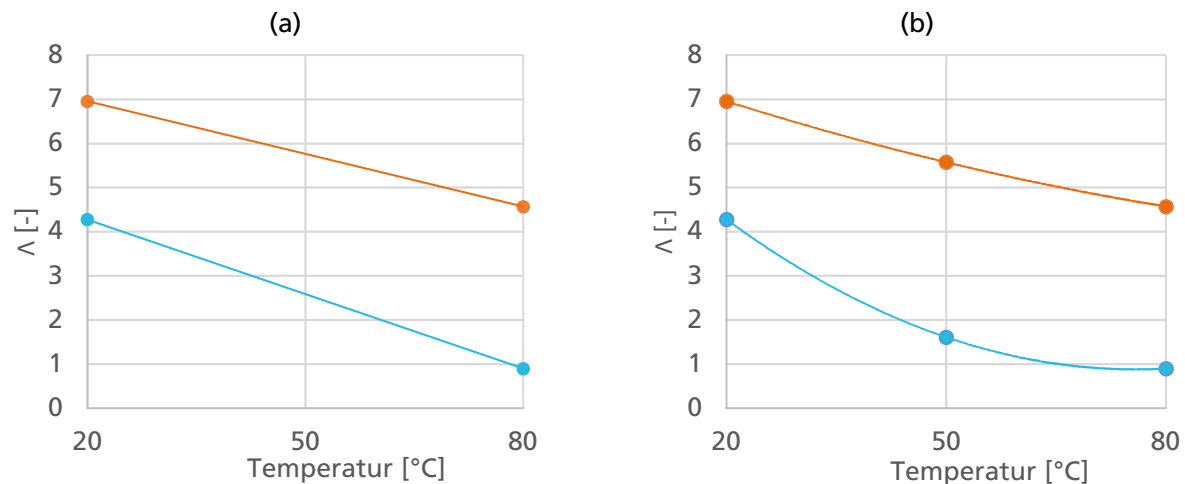


Bild 38: Vergleich des linearen mit dem quadratischen Modell: a) Grafische Darstellung der linearen Interpolation mit insgesamt vier Ankerpunkten. b) Quadratische Interpolation über insgesamt sechs Ankerpunkte.

Man erkennt, dass bei 40 % r. H. der quadratische Term (5.13) klein im Verhältnis zum linearen Term ist, was im betrachteten Temperaturbereich auf einen überwiegend linearen Zusammenhang zwischen L_q -Wert und Temperatur schließen lässt. Bei $H = 70 \% \text{ r. H.}$ hingegen ist der quadratische Term größer und auch in der grafischen Darstellung (Bild 38b, blau) ist die Krümmung dieser Kurve deutlich erkennbar.

Die nachfolgende Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für die zu erwartenden Λ_q -Werte für verschiedene klimatische Bedingungen.

Tabelle 11: Ergebnisse der quadratischen Interpolation

Lambdawerte des quadratischen Lebensdauermodells					
		Feuchte [% r.H.]			
		40	50	60	70
Temperatur [°C]	20	7,0	6,1	5,2	4,3
	30	6,6	5,6	4,7	3,7
	40	6,2	5,2	4,2	3,2
	50	5,8	4,7	3,7	2,6
	60	5,4	4,3	3,1	2,0
	70	5,0	3,8	2,6	1,5
	80	4,6	3,4	2,1	0,9

Auch für das quadratische Modell wird eine Weibullanalyse durchgeführt und die charakteristischen Kenngrößen mit denen des quantitativen Modells verglichen.

So fällt auf, dass der Korrelationskoeffizient mit über 99 % geringfügig höher ist, als der des linearen Modells. Die B_{50} -Lebensdauer ist mit einem Wert von rund 65 Stunden jedoch deutlich höher als im Falle des linearen Lebensdauermodells. Die hohe B_{50} -Lebensdauer lässt sich so deuten, dass das quadratische Modell trotz der vermeintlich besseren Abbildegenauigkeit die PMA-Lebensdauer um rund 30 % unterschätzt was zu dem Schluss führt, dass es somit dem linearen Lebensdauermodell unterlegen ist.

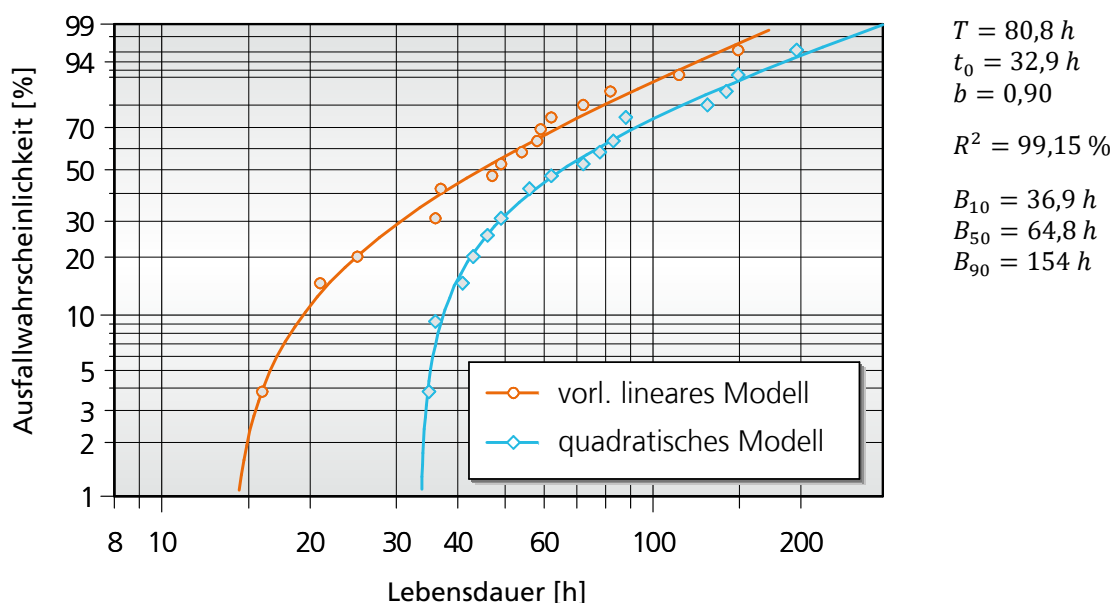


Bild 39: Gegenüberstellung quadratisches und lineares Lebensdauermodell

5.8.2 Berücksichtigung der Streuung der Ankerpunkte

Wie die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (Tabelle 6) zeigen, unterliegen die Lebensdauern der PMA selbst bei identischen Umgebungsbedingungen Streuungen. Die einzelnen Ankerpunkte, die für das quantitative Lebensdauermodell definiert wurden, basieren jeweils auf einer geringen Anzahl von experimentellen Messwerten. Aufgrund der beobachteten Schwankungen der gesamten Stichprobe in Kombination mit der jeweils geringen Anzahl von Messwerten, die den einzelnen Ankerpunkten zu Grunde liegen, ist davon auszugehen, dass die definierten Ankerpunkte den tatsächlichen Erwartungswerten der Datenpunkte nicht exakt entsprechen. Bild 40 zeigt qualitativ die Streuungen und den daraus resultierenden Erwartungswert am Beispiel der Λ -Werte der Messungen $i = 4, 5$ und 6 (Tabelle 6). Die drei Messungen wurden unter identischen Bedingungen bei $T = 80\text{ °C}$ und $H = 40\text{ \% r.H.}$ durchgeführt. Die Lebensdauern unterscheiden sich jedoch deutlich, so dass auch die resultierenden Λ -Werte unterschiedlich hoch ausfallen. Die schwarze Kurve in Bild 40 zeigt qualitativ die Verteilungsfunktion, wie sie für diese Kombination klimatischer Einflüsse aufgrund der drei Messungen angenommen wurde. Der Erwartungswert E entspricht hierbei dem arithmetischen Mittelwert. Aufgrund der aufgetretenen Schwankungen sind aber auch Verteilungsfunktionen anderer Breite und mit anderen Erwartungswerten möglich. Diese sind orange und grün gestrichelt in Bild 40 dargestellt.

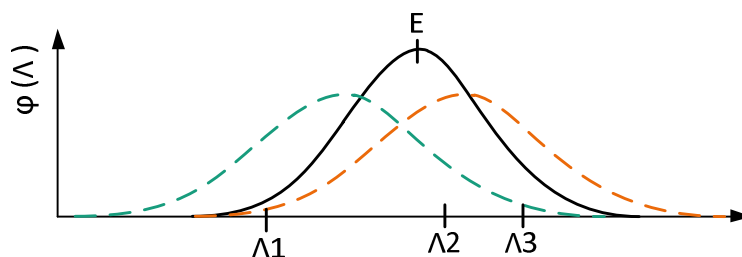


Bild 40: Einfluss der Streuung der PMA-Lebensdauern auf den daraus resultierenden Erwartungswert für die Ankerpunkte

Tabelle 12: Optimierte Ankerpunkte zur Reduktion von Fehlern aufgrund von Streuungen der Ankerpunkte

J_o	H	T	Quelle (Tabelle 6, i)	Λ_o
1	40 %	20 °C	1	6,9
2	40 %	80 °C	4, 5, 6	4,6
3	70 %	20 °C	11	3,6
4	70 %	80 °C	21	1,1

Da die tatsächliche Verteilungsfunktion der PMA-Lebensdauern bei diesen klimatischen Bedingungen aufgrund des geringen Stichprobenumfanges nicht exakt bestimmt werden kann, werden im Folgenden die in Tabelle 7 definierten Λ_j -Werte der einzelnen Ankerpunkte iterativ variiert, um die Werte zu ermitteln, für die die Abweichungen aller experimentell bestimmten Lebensdauern, gegenüber dem so optimierten PMA-Lebensdauermodell, minimal werden. Da der Fokus darauf liegt, die Optimierung der Ankerpunkte methodisch zu untersuchen, werden die Λ -Werte nur bis

zur ersten Nachkommastelle variiert. Die Anpassung erfolgt dabei manuell ohne Unterstützung spezieller Optimierungsalgorithmen oder EDV.

Für die in Tabelle 12 dargestellten λ_o -Werte der Ankerpunkte konnte ein Minimum der Fehler-summe und Summe der Fehlerquadrate gefunden werden. Man erkennt, dass beide Werte im Vergleich zum quantitativen Lebensdauermodell kleiner sind und somit davon auszugehen ist, dass das resultierende lineare Modell auf Basis der optimierten Ankerpunkte die tatsächliche PMA-Lebensdauer besser schätzt. Eine Analyse der resultierenden Weibullverteilung (Bild 41) bestätigt diesen Eindruck. Die B_{50} -Lebensdauer beträgt 51,7 Stunden bei einem Formparameter von $b = 1,47$, einer ausfallfreien Zeit von $t_0 \sim 14 \text{ h}$ und einem Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 98 \%$. Die leicht erhöhte B_{50} -Lebensdauer deutet darauf hin, dass das optimierte lineare Modell die PMA-Lebensdauern geringfügig unterschätzt, insgesamt aber dem quantitativen Modell überlegen ist.

Hieraus lässt sich schließen, dass die Optimierung der Ankerpunkte unter bestimmten Voraussetzungen eine geeignete Methode darstellt, die Aussagefähigkeit des PMA-Lebensdauermodells zu erhöhen. Werden im Laufe eines Produktlebenszyklus beispielsweise Lebensdauerdaten aus dem Feld bekannt, können diese durch eine Anpassung der Ankerpunkte leicht berücksichtigt und die Aussagekraft des Lebensdauermodells weiter erhöht werden.

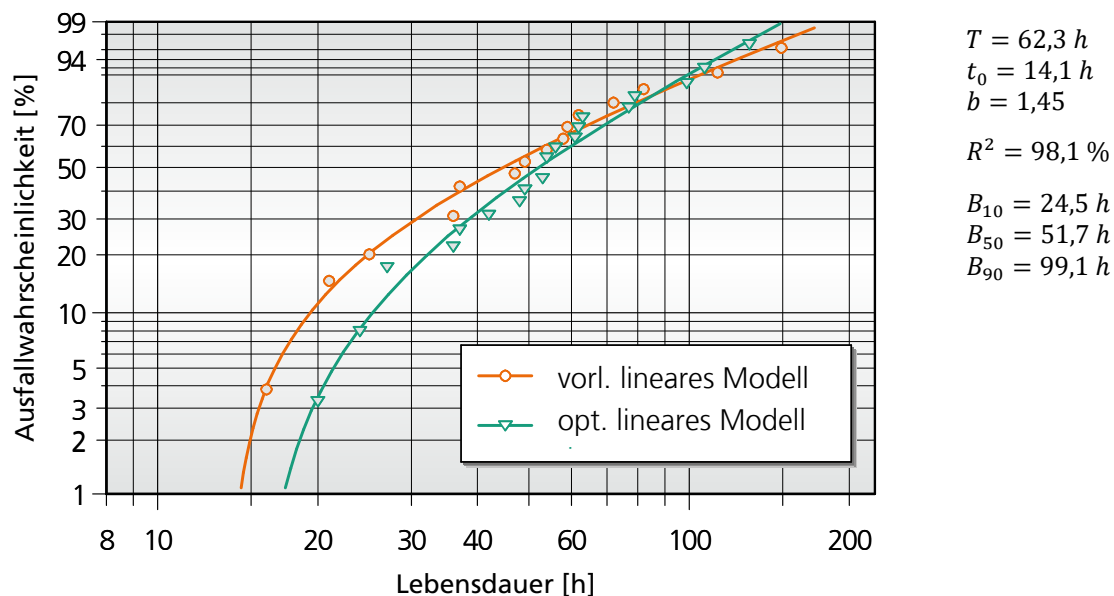


Bild 41: Vergleich des quantitativen linearen Modells (orange) mit dem linearen Modell auf Basis der manuell optimierten Ankerpunkte. Geringfügige Verbesserung sowohl des Korrelationskoeffizienten als auch der durchschnittlichen Lebensdauer B_{50}

5.8.3 Beschreibung der Ausfallcharakteristik mittels Log-Normalverteilung

Die Weibullverteilung bietet die Möglichkeit verschiedene Verteilungsfunktionen gut anzunähern, so dass diese in der Zuverlässigkeitstechnik häufig verwendet wird. Dennoch ist es denkbar, dass sich das Ausfallverhalten der hier beschriebenen PMA durch eine andere Verteilungsfunktion besser beschreiben lässt. In [47] wird beschrieben, dass die Lebensdauern einer Stichprobe von PMA anderen Typs log-normalverteilt sind. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, ist die Log-Normalverteilung gut geeignet zur Beschreibung des Ausfallverhaltens von Komponenten zur elektrischen Isolation sowie Halbleitern [51], so dass die Annahme der Log-Normalverteilung zur Beschreibung der PMA-Lebensdauer grundlegend plausibel ist.

Im Falle einer Log-Normalverteilung folgen die Logarithmen der betrachteten Zufallsvariable einer Normalverteilung. Daher wird im Folgenden überprüft, ob die Λ -Werte der virtuellen Lebensdauern normalverteilt sind. Aufgrund des geringen Stichprobenumfanges ist die Durchführung eines χ^2 -Tests mathematisch möglich, jedoch nicht sinnvoll. Mittels grafischer Betrachtung wird daher eine ideale Normalverteilung mit den virtuellen Lambdawerten aller nicht als Ankerpunkte verwendeten experimentellen Ergebnisse verglichen und anschließend subjektiv entschieden, ob die betrachteten Werte einer Normalverteilung folgen.

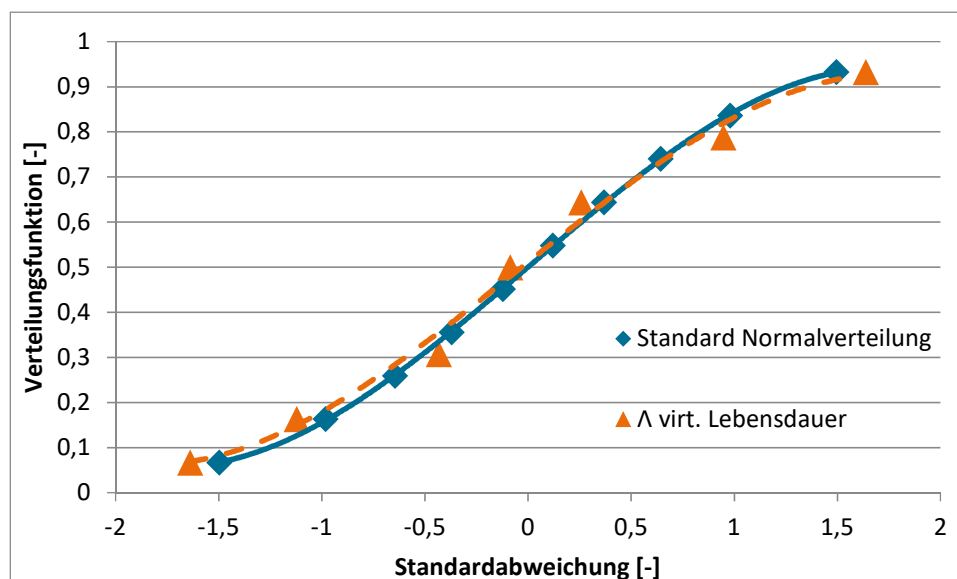


Bild 42: Untersuchung auf Normalverteilung: Vergleich einer Normalverteilung mit den virtuellen Lambdawerten der experimentellen Untersuchungen.

Die Gegenüberstellung der jeweiligen Verteilungsfunktion über dem Vielfachen der Standardabweichung ist in Bild 42 dargestellt. Die Rangzahlen werden für einen Stichprobenumfang von $n = 10$ ermittelt. Da die insgesamt 10 virtuellen Lambdawerte drei Paare gleichen Wertes enthalten, wurden diese Paare zu Gruppen zusammengefasst und die dazugehörigen Rangzahlen diesen angepasst. Hierdurch erscheinen in der grafischen Darstellung lediglich sieben Messpunkte (orange), die resultierende Verteilung entspricht jedoch den insgesamt zehn zugrundeliegenden Messpunkten.

Die Korrelationskoeffizienten der kubischen Regressionskurven betragen 100 % im Falle der Normalverteilung und 99,12 % im Falle der virtuellen experimentellen Ergebnisse. Man erkennt, dass beide Kurven sehr nah beieinanderliegen und der qualitative Verlauf gleich ist. Die Übereinstimmung der Kurven könnte maximiert werden, indem die Standardabweichung der experimentellen Daten modifiziert würde, dies soll an dieser Stelle jedoch nicht weiterverfolgt werden, da das Ziel dieser Betrachtung lediglich darin besteht, den qualitativen Verlauf der Verteilungsfunktion zu bestimmen.

Es ist folglich davon auszugehen, dass die Λ -Werte der experimentellen Untersuchungen näherungsweise einer Normalverteilung folgen und die Lebensdauern der PMA entsprechend log-normalverteilt sind.

Im Folgenden soll daher überprüft werden, ob eine Log-Normalverteilung im Stande ist, die virtuellen Lebensdauerwerte der experimentellen Untersuchungen besser abzubilden als die zuvor ermittelte Weibullverteilung. Die für die Weibullanalyse berechneten virtuellen Lebensdauern können hierfür direkt verwendet werden. Die Berechnung der charakteristischen Kenngrößen und die grafische Darstellung erfolgt erneut mittels des PC-Programms Visual-XSel und ist in Bild 43 abgebildet.

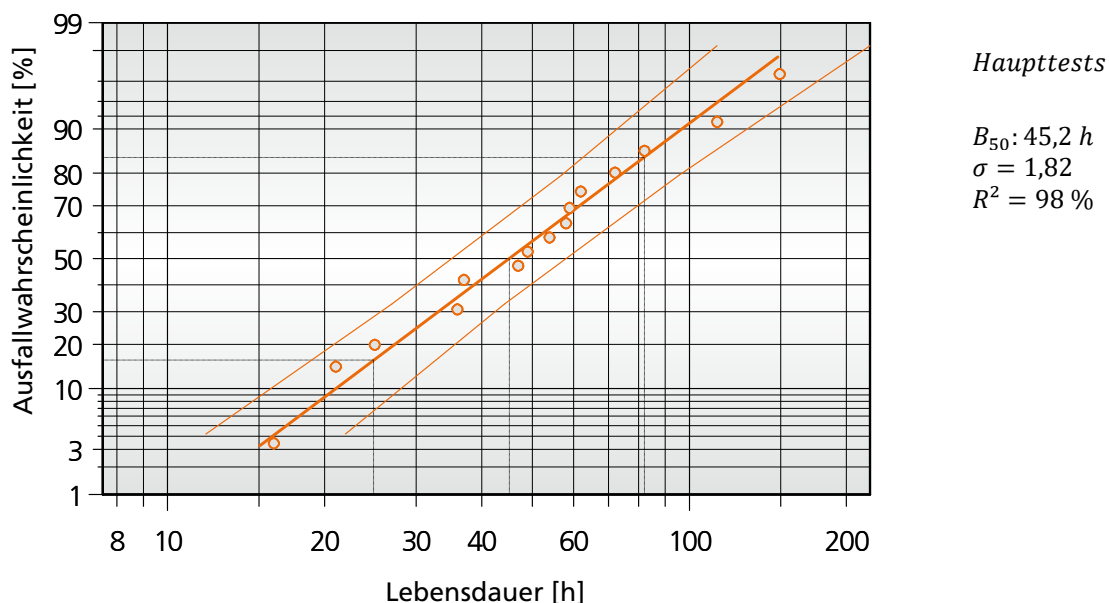


Bild 43: Log-Normalverteilung des quantitativen Lebensdauermodells für PMA mit 5 %- und 95 %-Vertrauensgrenze.

Die ermittelte Medianlebensdauer beträgt 45,2 Stunden, der Streufaktor liegt bei 1,82. Es ist erneut zu beobachten, dass die durchschnittlich zu erwartende Lebensdauer der Verteilungsfunktion rund 10 % unterhalb des Soll-Wertes von $B_{50} = 50 \text{ h}$ liegt. Dies deutet im Falle der Log-Normalverteilung darauf hin, dass das quantitative Lebensdauermodell aus Kapitel 5.7 die tatsächliche PMA-Lebensdauer leicht überschätzt, die gemessenen Werte folglich hinter den Modellwerten zurückbleiben.

Der Korrelationskoeffizient ist mit 98 % geringfügig niedriger als der Korrelationskoeffizient der entsprechenden 3-parametrischen Weibullverteilung von rund 99 %. Der Korrelationskoeffizient der 3-parametrischen Weibullverteilung des optimierten linearen Lebensdauermodells aus Kapitel 5.8.2 beträgt ebenfalls rund 98 %, der des quadratischen Lebensdauermodells aus Kapitel 5.8.1 hingegen 99 %, so dass an dieser Stelle aufgrund der Korrelationskoeffizienten keine grundlegende Aussage darüber getroffen werden kann, welchem Typ von Verteilungsfunktion die ermittelten und virtuellen Lebensdauerwerte am besten entsprechen. Die Ursache dieses Umstandes liegt in der begrenzten Größe der Stichprobe, die eine sichere Unterscheidung nicht ermöglicht.

Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den Ergebnissen des quantitativen Lebensdauermodells und der Beschreibung mittels Log-Normalverteilung wird, aufgrund der universellen Einsetzbarkeit der Weibullverteilung, dieser für die weiteren Schritte der Vorzug gegenüber der Log-Normalverteilung gegeben. Auch eine Plausibilitätsbetrachtung führt zur Annahme, dass die Weibullverteilung geeignet ist, die Lebensdauerverteilung der betrachteten PMA zu beschreiben. Eine Log-Normalverteilung hingegen führt bei hohen Lebensdauern zwangsweise zu abnehmenden Ausfallraten, was einem bis zum Ausfall degradierenden System entgegenspricht.

Auch wenn nicht zweifelsfrei geklärt werden konnte, dass die ermittelten Lebensdauerwerte nicht doch lognormalverteilt sind überwiegen die universellen Einsatzmöglichkeiten und der hohe Bekanntheitsgrad der Weibullverteilung den etwaigen Nachteil in der Lebensdauerbeschreibung.

5.9 Step Stress Monitoring (SSM)

Die Ergebnisse der Haupttests (Kapitel 5.6) zeigen, dass die Belastbarkeit der betrachteten PMA Streuungen unterliegen. Werden mehrere PMA getestet, können selbst unter denselben Testbedingungen große Abweichungen in den erzielten Lebensdauern festgestellt werden. Gleichzeitig zeigen alle untersuchten PMA nach einer Startphase eine kontinuierliche Degradation über weite Leckstrombereiche, die keinen größeren Schwankungen im Verlauf unterliegen. Dieser Umstand begründet ein neues Untersuchungsverfahren, bei dem der Informationsgehalt der jeweiligen Degradationsverläufe gesteigert und effizienter genutzt wird.

Es wird daher im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, den Einfluss von streuenden Belastbarkeiten einzelner Proben auf die Ergebnisse der Einflüsse der Belastungsparameter zu reduzieren und so auch bei geringem Stichprobenumfang Aussagen über den Einfluss verschiedener Umgebungs- und Lastparameter zu treffen. Hierzu wird das Verfahren des *Step Stress Testing* (Kapitel 2.2.1) aufgegriffen und um eine kontinuierliche Messung der Degradation (Monitoring) ergänzt. Während stufenweise die Einflussparameter und damit die Belastung des PMAs variiert werden, wird zeitgleich die Degradation in Form des Leckstroms gemessen, wie es bereits bei den vorangegangenen Untersuchungen erfolgte (Bild 44). Aus den unterschiedlichen zeitlichen Verläufen der Degradation bei den jeweiligen Laststufen können später Rückschlüsse über den quantitativen Zusammenhang zwischen Einflussparameter und Beanspruchung gezogen werden. Hierzu werden

zunächst die einzelnen Degradationsverläufe den jeweiligen Belastungen zugeordnet und anschließend der zeitliche Verlauf extrapoliert. Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigen (Kap. 5.3.3), folgt die Zunahme der PMA-Degradation charakteristisch einem logarithmischen Verlauf. In Bild 45 sind beispielhaft zwei solcher Degradationsverläufe dargestellt. Diese wurden im Rahmen der Haupttests aufgenommen. Man erkennt, dass nach einer kurzen Startphase (grau hinterlegt), in der der Anstieg des Leckstroms progressiv zunimmt, der Verlauf der Kurve logarithmisch verläuft, der Leckstrom also degressiv mit fortschreitender Zeit ansteigt.

Aufgetragen über einer logarithmischen Zeitachse erkennt man, dass die Leckstromzunahme nach dem Bereich der Startphase linear verläuft (Bild 46). Entlang dieser kann mit Hilfe von Ausgleichsgeraden sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren Lebensdauern hin extrapoliert werden. Aus den Schnittpunkten der Ausgleichsgeraden mit zwei zuvor festgelegten Leckstromwerten resultieren relative Zeitdauern. Diese Zeitdauern entsprechen nicht zwingend der PMA-Lebensdauer, sind jedoch qualitativ ähnlich.

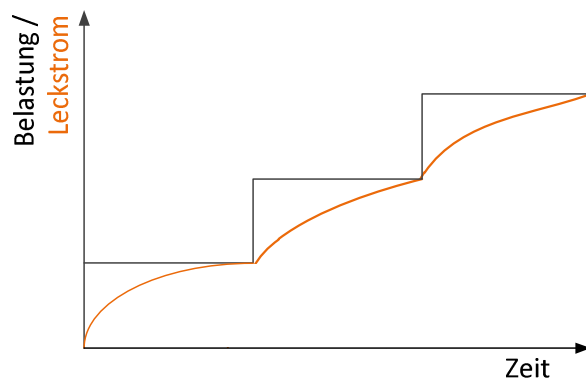


Bild 44: Schematischer Verlauf eines Step Stress Monitorings und der daraus resultierenden Zunahme des Leckstroms

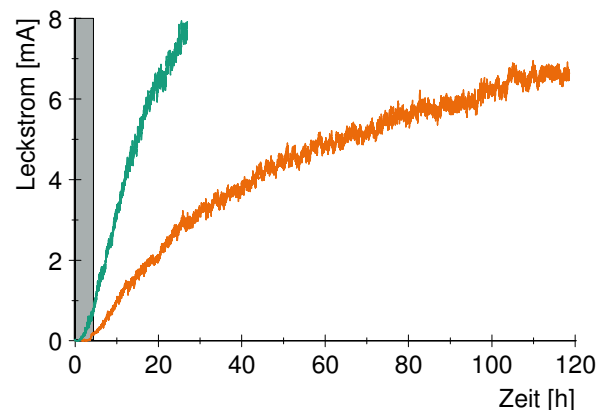


Bild 45: Beispielhafter Verlauf zweier charakteristischer Leckstromkurven (grün und orange). Grau hinterlegt der Bereich der Startphase. Innerhalb dieses Bereichs nimmt der Leckstrom progressiv zu.

Bild 46 visualisiert das Vorgehen am Beispiel der zuvor in Bild 45 dargestellten Messungen. Durch die logarithmische Teilung der Zeitachse ergeben sich nach Glättung der Messwerte ab einem Leckstromwert von ca. $I_L = 2 \text{ mA}$ annähernd lineare Verläufe (orange und grün). Die schwarz gestrichelten Linien zeigen die Ausgleichsgeraden, welche die $I_L = 4 \text{ mA}$ Grenze schneiden und bis zur $I_L = 0 \text{ mA}$ Linie extrapoliert werden. Die grüne bzw. orange gestrichelte Linie projiziert den Schnittpunkt der jeweiligen Ausgleichsgeraden mit der $I_L = 4 \text{ mA}$ Grenze auf die Zeitachse. Man erkennt, dass sich die Verläufe der Kurven wie auch die Ausgleichsgeraden sowohl in ihrer Steigung als auch in ihrer Lage deutlich unterscheiden. Allgemein gilt, dass je steiler die Ausgleichsgerade verläuft, desto schneller findet die Degradation im PMA statt und desto kürzer ist die Lebensdauer.

Wird ein einzelner Aktor, wie in Bild 44 schematisch dargestellt, mit mehreren Belastungsstufen innerhalb eines einzigen Tests belastet, lässt sich der Verlauf der Degradation in mehrere Abschnitte unterteilen, von denen jeder einer Belastungsstufe entspricht. Werden diese auf einer logarithmischen Zeitachse aufgetragen, ergeben sich grafisch verschiedene Abschnitte, die, wie bereits am Beispiel in Bild 46 gezeigt, durch entsprechende Ausgleichsgeraden angenähert werden können (Bild 47). Da der PMA bei jeder einzelnen Belastungsstufe eine Degradation erfährt, ist es notwendig, den Offset der Zeitachse für jedes einzelne Teilstück zu bestimmen. Dies geschieht in Anlehnung zur Bestimmung von ausfallfreien Zeiten t_0 im Rahmen einer Weibullanalyse durch Linkverschiebung des entsprechenden Teilstücks, bis die Krümmung der Messkurve über weite Bereiche ausreichend gering ist. Im Anschluss können die relativen Dauern (θ_i) ermittelt werden, die zwischen den Schnittpunkten der jeweiligen Ausgleichsgeraden mit den $I_L = 0 \text{ mA}$ und $I_L = 4 \text{ mA}$ -Grenzen liegen. Auf Basis der zuvor beobachteten Zusammenhänge ist daher davon auszugehen, dass das Verhältnis zwischen den so ermittelten relativen Dauern mit dem Verhältnis der entsprechenden L' -Werte des linearen Lebensdauermodells korreliert:

$$\theta_i / \theta_{i+1} \cong L'_i / L'_{i+1} \quad (5.15)$$

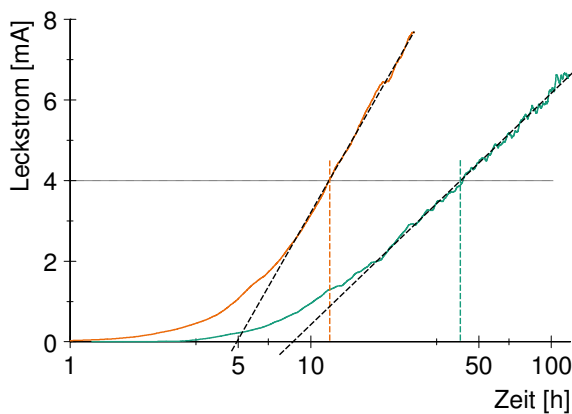


Bild 46: Darstellung der Leckstromkurven aus Bild 45 über logarithmisch geteilter Zeitachse mit Ausgleichsgeraden

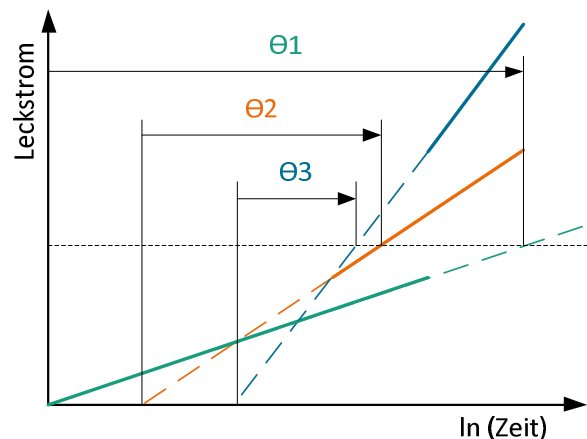


Bild 47: Schematische Auswertung eines Step Stress Monitorings. Zerlegung der Leckstromkurve in Bereiche unterschiedlicher Belastung

Im Folgenden soll anhand vier beispielhafter Messungen überprüft werden, ob der zuvor postulierte Zusammenhang zwischen den Verhältnissen der relativen Zeitdauern aus den Step Stress Monitorings (SSM) und dem Verhältnis der Modelllebensdauern zutreffend ist und ob sich auf diese Weise das quantitative lineare Lebensdauermodell, hinsichtlich der Abschätzung der Einflussparameter, verifizieren lässt. Weiter wird grundlegend untersucht, ob sich die beschriebene Methode zur wirtschaftlichen Quantifizierung von Umwelt- oder Lasteeinflüssen auf PMA eignet. Als Testobjekte werden vier weitere PMA verwendet.

5.9.1 SSM 1: Variation der Temperatur

Die erste Untersuchung der SSMs hat zum Ziel, den Einfluss der Umgebungstemperatur auf die PMA-Lebensdauer zu quantifizieren. Der Test wurde vollständig bei $H = 50 \% r.H.$ durchgeführt, wobei die Temperatur in zwei Stufen angehoben wurde. In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Stufen des Tests mit den entsprechenden klimatischen Bedingungen und der aus dem linearen Modell resultierenden Erwartung für die Lebensdauer (L') dargestellt.

Tabelle 13: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 1. SSM

Stufe	T [°C]	r. H. [%]	L' [h]
1	50	50	110
2	64,2	50	57
3	78,4	50	29

Die jeweilige Stufendauer wurde individuell während der Messung festgelegt. Die jeweilige Zunahme des Leckstroms sollte hierbei je Stufe zwischen $2 \text{ mA} < \Delta I_L < 4 \text{ mA}$ liegen.

5.9.1.1 Durchführung des 1. SSMs

Entgegen den Erwartungen steigt der Leckstrom deutlich schneller an. Bereits nach weniger als vier Stunden wird ein Leckstrom von rund $I_L \sim 3 \text{ mA}$ gemessen, so dass bereits nach dieser kurzen Testdauer die Temperatur erstmalig erhöht wird. Nach weiteren rund drei Stunden erreicht der Leckstrom einen Wert von: $I_L > 5 \text{ mA}$ absolut und über 2 mA im Vergleich zum Ende der ersten Stufe, so dass nach insgesamt rund 6,5 Std. die Temperatur abermals erhöht wird.

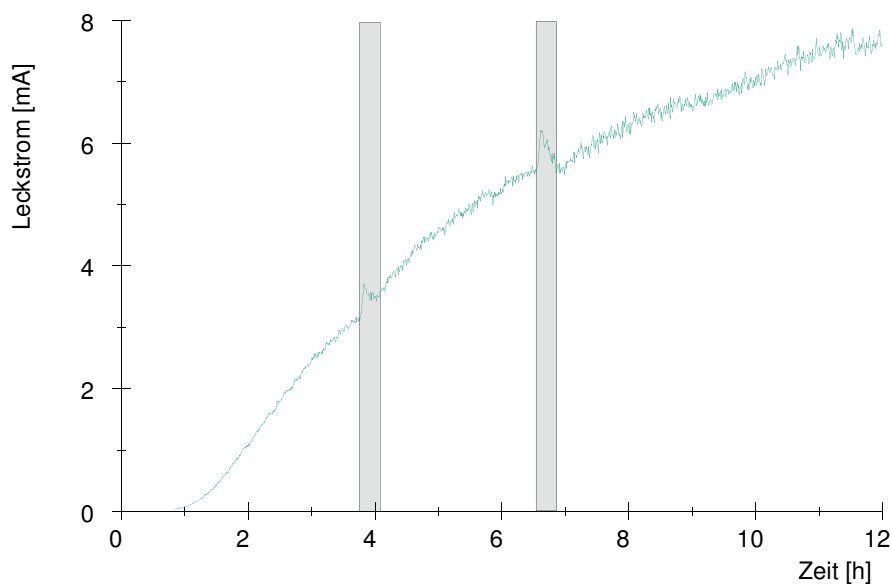


Bild 48: Zeitlicher Verlauf des 1. SSMs. Die Temperatur wird in zwei Schritten erhöht (grau), mit entsprechender Auswirkung auf die Zunahme des Leckstroms (grün).

Bild 48 zeigt den zeitlichen Verlauf des Leckstroms. Man erkennt grau hinterlegt die Zeitpunkte, zu denen die Temperatur angehoben wurde. Es fällt auf, dass jeweils mit der Steigerung der Temperatur kurzzeitig Ausschläge des Leckstroms zu beobachten sind. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in den Eigenschaften der Klimakammer. So kann es während der Änderung der Temperatur zu einem Überspringen sowohl der Temperatur als auch der relativen Feuchte kommen, wodurch starke Schwankungen des PMA-Leckstroms verursacht werden können.

Bereits vor der endgültigen Auswertung der Messdaten ist ersichtlich, dass der in dieser Messung verwendete PMA eine stark unterdurchschnittliche Belastbarkeit aufweist und wohl auch unter konstanten klimatischen Bedingungen, lange vor der erwarteten Lebensdauer von 110 Stunden, einen kritischen Leckstrom von $I_L = 4 \text{ mA}$ erreicht hätte.

5.9.1.2 Auswertung des 1. SSMs

Das nachfolgende Bild 49 zeigt die grafische Auswertung der Daten. Hierzu werden zunächst die Messwerte geglättet, indem der fließende Durchschnitt über eine Zeitdauer von 10 Minuten gebildet wird. Anschließend werden die Phasen unterschiedlicher Belastung getrennt und derart auf der logarithmischen Zeitachse verschoben, dass sich eine bestmögliche Deckung mit einer Ausgleichsgeraden ergibt.

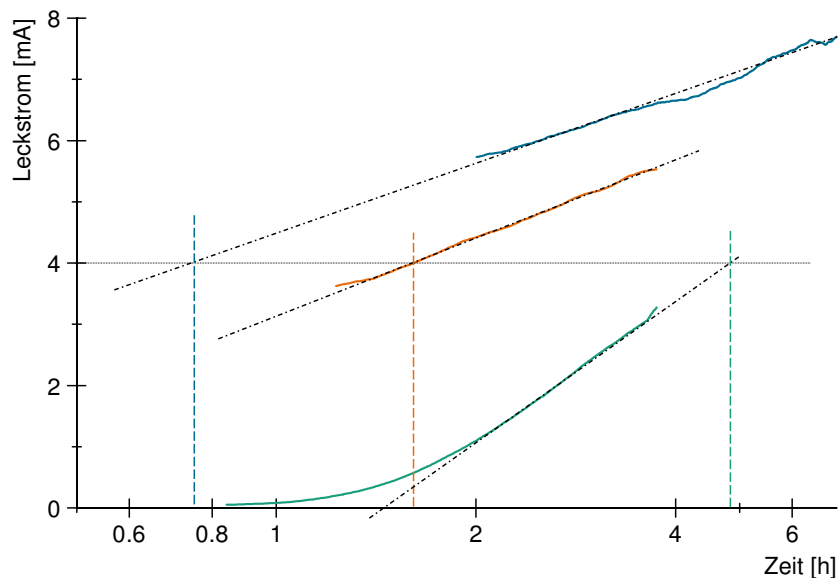


Bild 49: Auswertung des 1. SSMs, drei unabhängige lineare Verläufe des Leckstroms über logarithmischer Zeitachse. Insgesamt geringe Lebensdauer des PMAs, aber gute Abschätzung des Temperatureinflusses.

Die relativen Zeitdauern θ_i , die von den jeweiligen Ausgleichsgeraden beschrieben werden, ergeben sich zu 3,4; 1,6 und 0,75 Stunden und fallen damit deutlich geringer aus, als das lineare Lebensdauermodell erwarten lässt. Der Quotient der relativen Zeitdauern θ_i/θ_{i+1} der jeweiligen Phasen beträgt sowohl zwischen den Phasen 1 und 2 sowie zwischen den Phasen 2 und 3 rund 2,13.

Basierend auf dem quantitativen Lebensdauermodell wäre mit Quotienten der PMA-Lebensdauern L'_i/L'_{i+1} von rund 1,93 bzw. 1,97 zu rechnen.

Tabelle 14: Ergebnisse des 1.SSMs: Einfluss der Temperatur

SSM 1	Vergleich
Zeitdauer	Quotient
$\theta_1 = 3,4 \text{ h}$	
$\theta_2 = 1,6 \text{ h}$	$\theta_1/\theta_2 = 2,13$
$\theta_3 = 0,75 \text{ h}$	$\theta_2/\theta_3 = 2,13$
	$L'_1/L'_2 = 1,93$
	$L'_2/L'_3 = 1,93$

5.9.1.3 Bewertung des 1. SSMs

Zwar tritt die Degradation bei dem betrachteten PMA deutlich schneller ein, als es aufgrund des linearen Lebensdauermodells zu erwarten wäre, jedoch ist aufgrund des charakteristischen Verlaufs der Leckstromkurve davon auszugehen, dass der Mechanismus, der zur Degradation führt, vergleichbar ist mit dem, der für die Degradation in PMA mit normaler Lebensdauer verantwortlich ist. Weiter zeigt der Zusammenhang zwischen der Steigerung der Temperatur und der resultierenden Beschleunigung der PMA-Degradation sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Übereinstimmung zum linearen Modell.

5.9.2 SSM 2: Variation der relativen Feuchte

Im Anschluss an die Messung zur Untersuchung des Temperatureinflusses wird eine vergleichbare Messung mit veränderlicher r. H. durchgeführt. Erneut werden die Stufen derart gewählt, dass ein Wechsel von einer zur folgenden Stufe ungefähr eine Halbierung der resultierenden Lebensdauer zur Folge hat. Als Ausgangspunkt wird wie in der vorangegangenen Messung eine Kombination von $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ und $H = 50 \text{ } \% \text{ r.H.}$ gewählt. Die vollständigen Messpunkte sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 2. SSMs

Stufe	T [°C]	r.H. [%]	L' [h]
1	50	50	110
2	50	56,9	53
3	50	63,8	26

5.9.2.1 Durchführung des 2. SSMs

Im Vergleich zum ersten SSM nimmt der Leckstrom bei $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ und $H_1 = 50 \text{ } \% \text{ r.H.}$ langsamer zu, so dass die Zeitdauer bis zum ersten Anstieg der relativen Feuchte auf $H_2 = 56,9 \text{ } \% \text{ r.H.}$ mit rund 20 Stunden länger gewählt werden kann. Nach weiteren 12 Stunden wird die relative Feuchte auf

den endgültigen Wert von $H_3 = 63,8 \% r.H.$ gesteigert. Nach einer Gesamtdauer von rund 38 Stunden kommt es aufgrund eines Softwarefehlers zu einem Aussetzen der Datenaufzeichnung. Nach weiteren rund 12 Stunden wird der Fehler bemerkt und behoben, so dass gegen Ende der Messung die Datenaufzeichnung fortgesetzt wird. Der Verlauf des Leckstroms ist in Bild 50 dargestellt. Man erkennt im Bereich der ersten r. H.-Änderung wieder einen deutlichen Sprung in der Leckstromkurve, während ihr Verlauf im Bereich des zweiten Anstiegs nahezu kontinuierlich verläuft. Weiter erkennt man im Bereich zwischen 38 und 50 Stunden die fehlenden Messwerte infolge des Softwarefehlers.

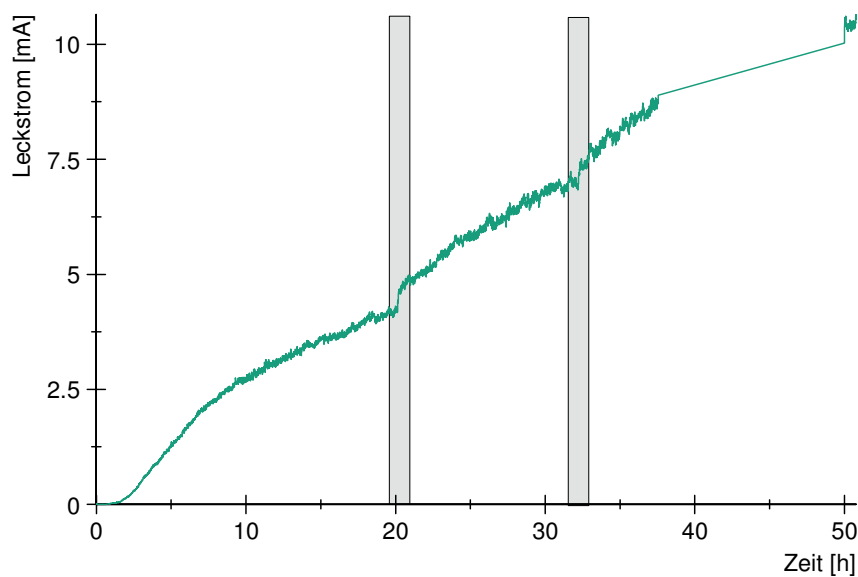


Bild 50: Zeitlicher Verlauf des 2. SSMs

5.9.2.2 Auswertung des 2. SSMs

Tabelle 16 und Bild 51 zeigen die Ergebnisse der grafischen Auswertung. Die resultierenden relativen Zeitdauern fallen – wie auch schon die Ergebnisse des ersten SSMs – mit 15,8 h, 6,8 h und 2,8 h deutlich kürzer aus als das lineare Lebensdauermodell erwarten lässt, was den Schluss nahelegt, dass auch der hier betrachtete PMA nur eine unterdurchschnittliche Belastbarkeit aufweist. Der Quotient der relativen Dauern beträgt mit $\theta_1/\theta_2 = 2,32$ bzw. $\theta_2/\theta_3 = 2,43$, Werte, die etwas höher liegen, als das quantitative lineare Modell erwarten lässt.

Tabelle 16: Ergebnisse des 2. SSMs: Einfluss der Feuchte. Es werden die erzielten Einflussfaktoren mit den aus dem linearen Modell erwarteten verglichen.

SSM 2		Vergleich
Zeitdauer	Quotient	Lineares Modell
$\theta_1 = 15,8 h$	$\theta_1/\theta_2 = 2,32$	$L'_1/L'_2 = 2,08$
$\theta_2 = 6,8 h$		
	$\theta_2/\theta_3 = 2,43$	$L'_2/L'_3 = 2,04$
$\theta_3 = 2,8 h$		

5.9.2.3 Bewertung des 2. SSMs

Erneut ist die nominelle PMA-Lebensdauer geringer als erwartet. Der charakteristische Kurvenverlauf hingegen ist typisch und zeigt keine Auffälligkeit. Der quantitative Zusammenhang zwischen Anstieg der r. H. und Zunahme der Degradationsrate ist, wie bereits im SSM 1, leicht erhöht. In Anbetracht der unterdurchschnittlichen PMA-Belastbarkeit ist dieses Ergebnis jedoch positiv zu werten und der im linearen Lebensdauermodell ermittelte Zusammenhang wurde bestätigt.

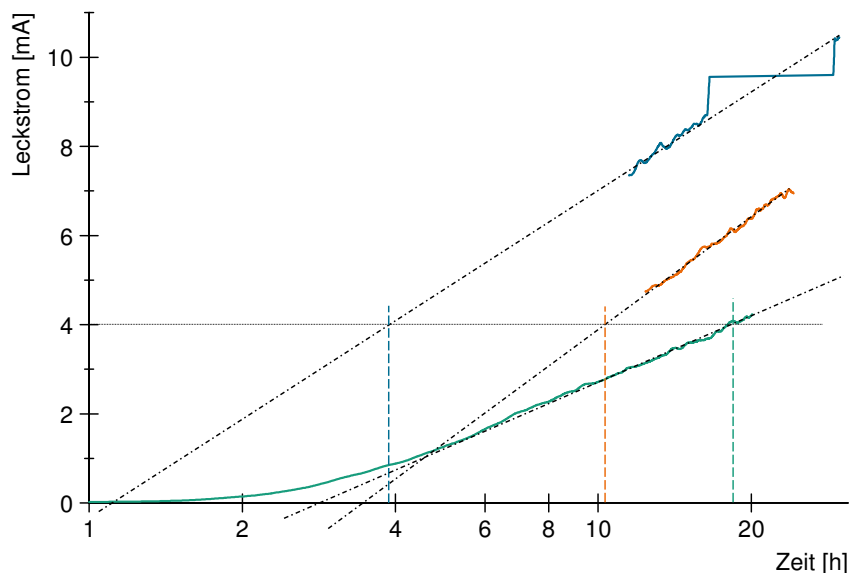


Bild 51: Auswertung des 2. SSMs: Insgesamt längere Zeitdauern als im 1. SSM, aber eine insgesamt kurze Lebensdauer

5.9.3 SSM 3: Variation von Feuchte und Temperatur

Nachdem mit den SSMs 1 und 2 gezeigt werden konnte, dass sich die Einflüsse der relativen Feuchte oder der Temperatur an einem einzigen PMA prinzipiell quantifizieren lassen, soll im nächsten Schritt überprüft werden, ob am selben PMA sowohl der Einfluss der Feuchte als auch der Temperatur quantifiziert werden kann. Hierzu wird im dritten SSM zunächst in einem Schritt die Feuchte und anschließend im nächsten Schritt die Temperatur angehoben. Die Stufen werden hierbei derart gewählt, dass wieder mit einer ungefähren Halbierung der zu erwartenden PMA-Lebensdauer von Stufe zu Stufe zu rechnen ist (Tabelle 17).

Tabelle 17: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 3. SSMs

Stufe	T [°C]	r.H. [%]	L' [h]
1	72,2	40	125
2	72,2	46,4	58
3	86,8	46,6	30

5.9.3.1 Durchführung des 3. SSMs

Es ist aus der Messkurve in Bild 52 direkt ersichtlich, dass der verwendete PMA eine deutlich höhere Belastbarkeit aufweist als die beiden PMA aus den SSMs 1 und 2. Nach rund 110 Stunden wird der erste Stufenanstieg von $H_1 = 40 \% r.H.$ auf $H_2 = 46,6 \% r.H.$ vorgenommen. Zu diesem Zeitpunkt erreicht der Leckstrom einen Wert von rund 2 mA. Nach weiteren rund 75 Stunden wird bei einem Leckstromwert von rund $I_L = 6 \text{ mA}$ die Temperatur von $T_2 = 72,2^\circ\text{C}$ auf $T_3 = 86,8^\circ\text{C}$ angehoben. Die gesamte Testdauer beträgt ca. 240 Stunden.

Aufgrund von Softwarefehlern kam es erneut zu Unterbrechungen während der Messungen, wie sie bereits gegen Ende des zweiten SSMs aufgetreten sind. In Folge der insgesamt langen Messdauer konnten die Leckstromverläufe des gesamten Tests jedoch ausreichend gut erfasst werden, so dass eine Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs möglich ist. Dieser ist in Bild 52 dargestellt.

Die nachfolgende Auswertung der Messdaten zeigt zunächst eine zeitlich sehr lange Startphase von rund 70 Stunden. Die Auswertung des anschließenden Kurvenverlaufs lässt auf die in Tabelle 18 dargestellten relativen Zeitdauern schließen.

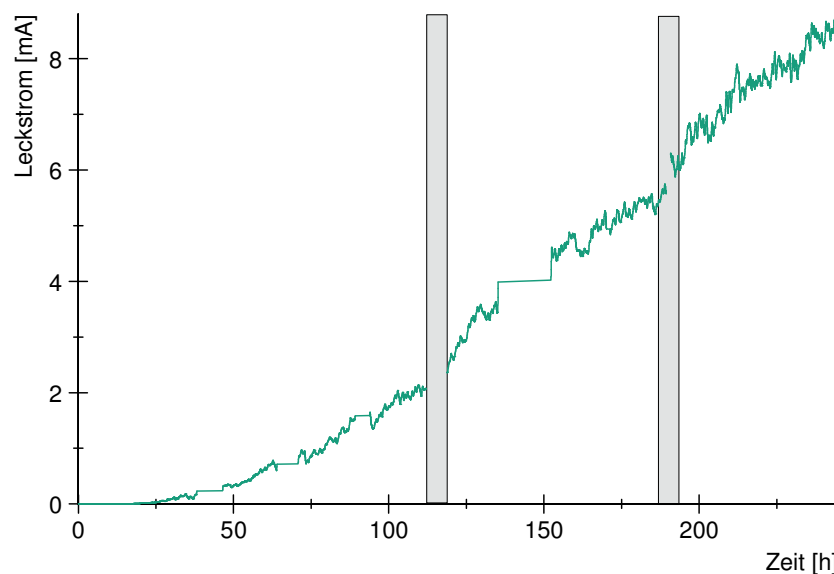


Bild 52: Zeitlicher Verlauf des 3. SSMs

5.9.3.2 Auswertung des 3. SSMs

Man erkennt, dass die relativen Dauern des PMAs deutlich näher an der erwarteten PMA-Lebensdauer L' auf Basis des linearen Modells liegen als bei den ersten beiden SSMs. Der erste Quotient ist mit einem Wert von $\theta_1/\theta_2 = 2,64$ deutlich größer als erwartet. Eine mögliche Ursache hierfür kann in der langen Startphase von rund 70 Stunden liegen. Der zweite Quotient liegt mit einem Wert von $\theta_2/\theta_3 = 2,12$ deutlich näher am – nach dem linearen Modell erwarteten – Wert von 1,93 und entspricht dem Wert, der bereits während des ersten SSMs ermittelt wurde, bei welchem lediglich die Temperatur verändert wurde.

5.9.3.3 Bewertung des 3. SSMs

Im Gegensatz zu den vorangegangenen SSMs weist der PMA eine hohe nominelle Lebensdauer auf. Entsprechend fällt das erste Teilergebnis deutlich zu hoch aus. Das zweite Teilergebnis liegt mit $\theta_2/\theta_3 = 2,12$ jedoch wie die Ergebnisse der SSMs 1 und 2 nah am erwarteten Wert. Da im SSM 2 gezeigt werden konnte, dass grundlegend auch der Feuchteinfluss mit Hilfe eines SSMs quantifiziert werden kann, ist nicht davon auszugehen, dass das grundlegende Vorgehen zu dem zu hohen Beschleunigungsfaktor $\theta_1/\theta_2 = 2,64$ führte. Die Ursache für die lange relative Zeitdauer der ersten Stufe hängt möglicherweise mit der ebenfalls langen Startphase zusammen, wobei die Ursachen für dieses Verhalten bisher nicht geklärt werden konnten.

Tabelle 18: Ergebnisse des 3. SSMs

SSM 3		Vergleich
Zeitdauer	Quotient	Lineares Modell
$\theta_1 = 140 \text{ h}$	$\theta_1/\theta_2 = 2,64$	$L'_1/L'_2 = 2,15$
$\theta_2 = 53 \text{ h}$		
	$\theta_2/\theta_3 = 2,12$	$L'_2/L'_3 = 1,93$
$\theta_3 = 25 \text{ h}$		

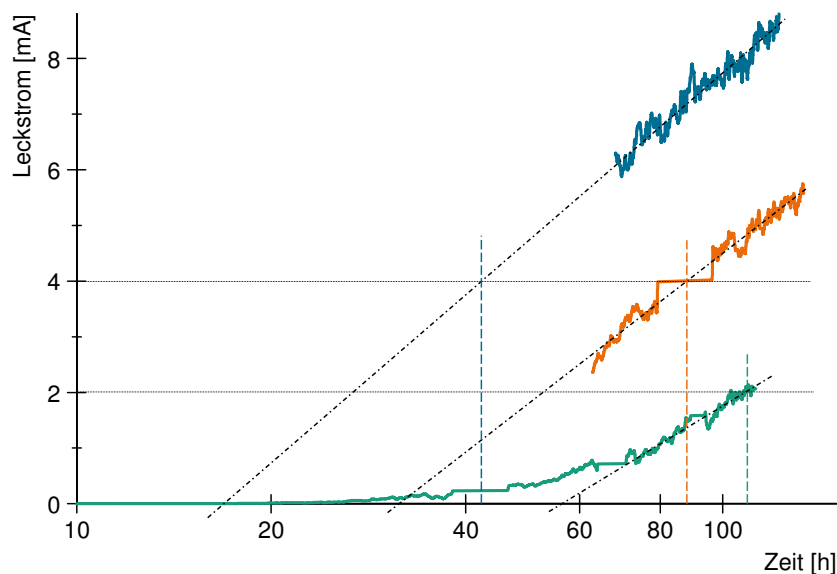


Bild 53: Auswertung des 3. SSMs

5.9.4 SSM 4: Untersuchung der Schrittweite

In den SSMs 1, 2 und 3 wurden bewusst Schrittweiten zum Anheben von Feuchte oder Temperatur gewählt, die näherungsweise einer Halbierung der PMA-Lebensdauer entsprechen.

Das vorrangige Ziel bestand darin, den erwarteten Quotienten der relativen Zeitdauern von ungefähr $\theta_i/\theta_{i+1} \sim L'_i/L'_{i+1} \sim 2$ zu bestätigen oder zu widerlegen, um die grundlegende Eignung der Methode zu überprüfen.

Soll der Einfluss eines Umwelt- oder Belastungsfaktors jedoch grundlegend quantifiziert werden, ist das Wissen um die Reduktion der PMA-Lebensdauer je Schrittweite in der Regel nicht vorhanden und muss zunächst erarbeitet werden. Gleichzeitig soll oftmals ein großer Bereich eines Einflussparameters überprüft werden, um einerseits grobe Richtwerte unter Vernachlässigung von statistischen Effekten zu erhalten (vergl. Kapitel 5.3, Vortests) und andererseits einen möglichst großen Gültigkeitsbereich der Arbeitshypothese zu definieren.

Hierzu wird oftmals die Schrittweite zwischen einzelnen Messpunkten entweder willkürlich getroffen oder anhand von Vorwissen grob geschätzt. Ist in frühen Stadien darüber hinaus kein konkretes Versagenskriterium bekannt, müssen auch die Grenzwerte der einzelnen Stufen oder die entsprechenden Zeitdauern geschätzt werden.

5.9.4.1 Durchführung des 4. SSM

Im Rahmen des vierten SSMs wird die relative Feuchte in zwei Stufen um jeweils 10 % -Punkte angehoben. Die resultierenden klimatischen Bedingungen sind in Tabelle 19 dargestellt. Der zeitliche Verlauf des Leckstroms ist in Bild 54 dargestellt. Zu Beginn des Tests nimmt der Leckstrom langsamer zu als erwartet. Nach rund 18 Stunden wird bei einem Wert von $I_L = 1 \text{ mA}$ die r. H. zum ersten Mal gesteigert. Nach weiteren rund sieben Stunden wird die relative Feuchte abermals auf den endgültigen Wert von $H_3 = 70 \text{ \% r.H.}$ eingestellt. Gegen Testende erreicht der Leckstrom einen Wert von $I_L = 7 \text{ mA}$.

Tabelle 19: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 4. SSMs

Stufe	T [°C]	r.H. [%]	L' [h]
1	64,2	50	57
2	64,2	60	18,5
3	64,2	70	6

5.9.4.2 Auswertung des 4. SSMs

Die Auswertung der Messkurve ist in Bild 55 zu sehen. Die Startphase wird auf rund 10 Stunden geschätzt. Die resultierende relative Zeitdauer der ersten Stufe lässt sich auf rund 200 Stunden schätzen. Der Wert steht jedoch aufgrund der weiten Extrapolation des entsprechenden Messkurvenabschnittes unter Vorbehalt. Es nicht auszuschließen, dass auch zum Ende des ersten Bereichs

die Startphase noch nicht endgültig abgeschlossen war, woraufhin die tatsächlich erreichte Zeitdauer bis zum Erreichen eines Leckstroms von $I_L = 4 \text{ mA}$ deutlich geringer ausgefallen wäre. Die relativen Zeitdauern der zweiten und dritten Stufe betragen ca. 16 h bzw. 5,3 h und liegen damit sehr nah an den Ergebnissen des linearen Modells. Auch der Quotient θ_2/θ_3 der relativen Zeitdauern liegt sehr nah am erwarteten Wert von 3,08 (Tabelle 20)

Tabelle 20: Ergebnisse des 4. SSMs

SSM 4		Vergleich
Zeitdauer	Quotient	Lineares Modell
$\theta_1 \gg 57 \text{ h}$		
	$\theta_1/\theta_2 > 3,56$	$L'_1/L'_2 = 3,08$
$\theta_2 = 16 \text{ h}$		
	$\theta_2/\theta_3 = 3,02$	$L'_2/L'_3 = 3,08$
$\theta_3 = 5,3 \text{ h}$		

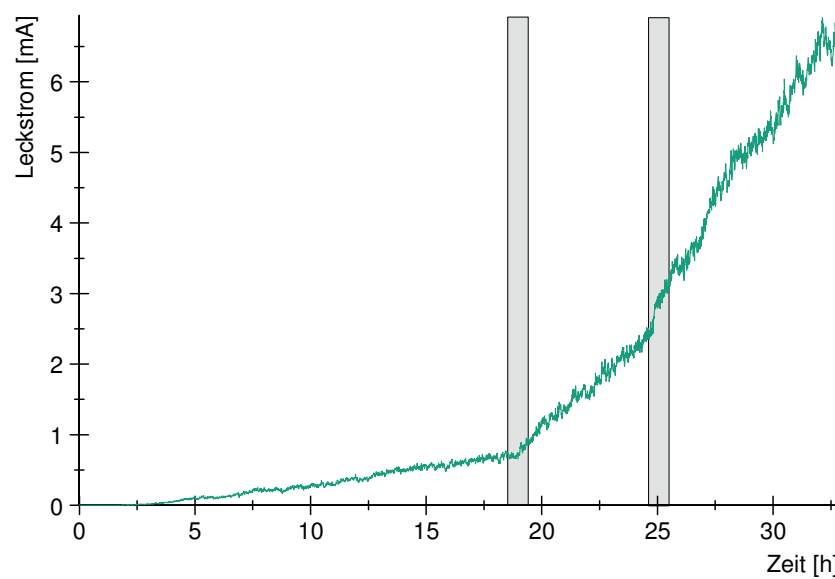


Bild 54: Zeitlicher Verlauf des 4. SSMs

5.9.4.3 Bewertung des 4. SSMs

Die ermittelten relativen Zeitdauern der Stufen 2 und 3 stimmen gut mit den erwarteten Lebensdauerwerten des quantitativen Modells überein. Gleichwohl ist – wie schon im SSM 3 – die Degradation während der ersten Stufe geringer als erwartet. Daraus resultiert, dass das erste Teilergebnis erneut die Erwartungen nicht bestätigen kann. Auch hier scheint die Startphase zum Ende der ersten Stufe noch nicht abgeschlossen zu sein, so dass die resultierende relative Zeitdauer θ_1 zu hoch ausfällt.

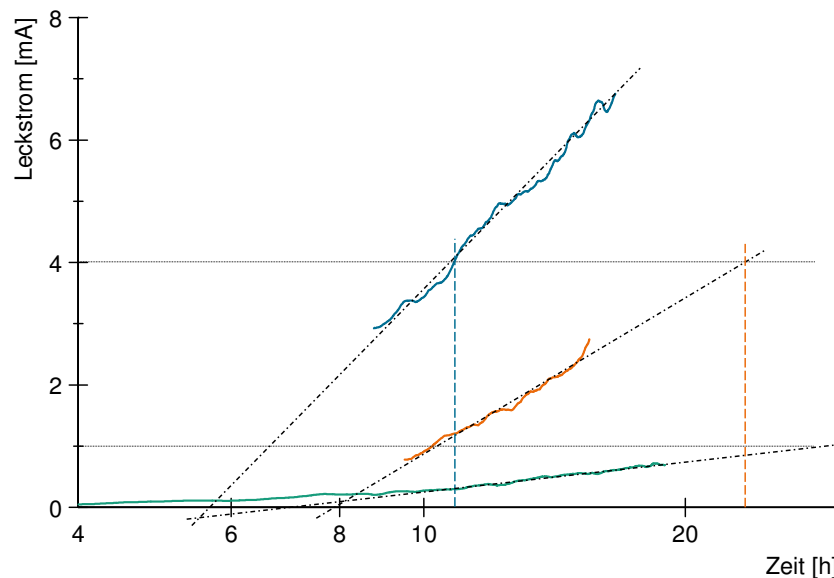


Bild 55: Auswertung des 4. SSMs

5.9.5 Zwischenfazit SSM

Im Rahmen der Haupttests traten große Streuungen der PMA-Lebensdauern auf (Kapitel 5.6). Die Ursache hierfür ist in erster Linie auf Streuungen der Belastbarkeit der einzelnen PMA zurückzuführen. Das daraus abgeleitete quantitative PMA-Lebensdauermodell sollte anschließend verifiziert werden, wobei nicht die Beschreibung, sondern eine weitgehende Unterdrückung der PMA-abhängigen Streuung gewünscht war. Hierdurch sollte der Zeit- und Materialaufwand für die Verifizierung gegenüber den Haupttests mit 21 PMA und einer kumulierten Testdauer von über 1000 Stunden deutlich reduziert werden.

Zusammengefasst erfüllt das SSM beide Erwartungen.

Das quantitative Lebensdauermodell (Kapitel 5.7) konnte mit Hilfe des SSM verifiziert werden. Zwar zeigte Kapitel 5.8, dass durch die Variation der Ankerpunkte die Summe der Fehlerquadrate zwischen den einzelnen Datenpunkten und dem quantitativen Lebensdauermodell reduziert werden kann, die beobachteten Abweichungen im Vergleich zur Streuung der PMA-Belastbarkeiten jedoch nur wenige Prozent betragen. Die Einflüsse von Feuchte und Temperatur auf die PMA-Lebensdauer wurden im Rahmen des SSM vergleichbar zu den Ergebnissen des Kapitels 5.7 bestimmt.

Besonderes Augenmerk sollte weiter auf die Ergebnisse der SSMs 1 und 2 gelegt werden. Die für diese Versuche verwendeten PMA zeigten auf der jeweils ersten Belastungsstufe eine deutlich unterdurchschnittliche Belastbarkeit von lediglich 20 % bzw. 5 % im Vergleich zur mittleren PMA-Lebensdauer, die bei der jeweiligen klimatischen Bedingung zu erwarten wäre. Die Abweichungen der Ergebnisse beider SSMs gegenüber dem quantitativen Lebensdauermodell betragen dennoch nur rund 10 %. Damit kann einerseits gezeigt werden, dass die Ausfallcharakteristik für PMA unterschiedlicher Belastbarkeit konstant ist und zum anderen, dass SSM eine geeignete Methode darstellt, Einflüsse auf die Degradation stark streuender Proben zu quantifizieren.

Wie die Ergebnisse der SSMs 3 und 4 zeigen, muss sichergestellt werden, dass zum Ende der ersten Teststufe die Startphase abgeschlossen ist. Andernfalls ginge mit der Bestimmung der relativen Zeitdauer θ_1 im Rahmen der Auswertung eine Überschätzung des Einflussparameters einher.

5.10 Verifiziertes PMA-Lebensdauermodell

Basierend auf dem quantitativen PMA-Lebensdauermodell aus Kapitel 5.7 und den Erkenntnissen aus der Verifizierung kann das endgültige Lebensdauermodell für die betrachteten PMA definiert werden.

Es setzt sich allgemein aus zwei Teilen zusammen:

1. Einem Term zur Beschreibung der Einflüsse von Feuchte und Temperatur auf die zu erwartende PMA-Lebensdauer
2. Einer Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Streuung der PMA-Lebensdauer

5.10.1 Mittlere Lebensdauer: Einfluss von Temperatur und Feuchte

Der Methodenvergleich ergab, dass die Beschreibung der Einflüsse von Feuchte und Temperatur gegenüber dem quantitativen Lebensdauermodell optimiert werden kann. Die Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen dem Logarithmus der PMA-Lebensdauer und der betrachteten Einflussfaktoren konnte bestätigt werden. Durch eine manuelle Variation der Ankerpunkte konnte die Summe der Fehlerquadrate minimiert und so die Abbildegengenauigkeit des Lebensdauermodells gesteigert werden.

Die manuell angepassten Ankerpunkte führen gegenüber dem quantitativen Modell zu veränderten Einflussparametern für Temperatur und Feuchte, welche in der nachfolgenden Tabelle 21 dargestellt sind.

Tabelle 21: Vergleich der ermittelten Einflussfaktoren des quantitativen und des verifizierten Modells

Einflussfaktor	Quantitatives Modell	Verifiziertes Modell
Feuchteeinfluss H	$-0,080$	$-0,108$
Temperatureinfluss T	$-2,17 \cdot 10^2$	$-3,39 \cdot 10^2$
Wechselwirkung T und H	$-5,0 \cdot 10^{-4}$	$-1,11 \cdot 10^{-4}$
Konstante	$11,03$	$11,98$

Gleichung (5.16) gibt den Zusammenhang zwischen den ermittelten Einflussgrößen des verifizierten Modells und dem Logarithmus der mittleren Lebensdauer an:

$$\Lambda_{(H,T)} = -\frac{0,108}{\% r.H.} \cdot H - \frac{3,39 \cdot 10^2}{^{\circ}C} \cdot T - \frac{1,11 \cdot 10^{-4}}{\% r.H.^{\circ}C} \cdot H \cdot T + 11,98 \quad (5.16)$$

Die beiden Gleichungen (5.7) und (5.16) ermöglichen die Abschätzung der mittleren PMA-Lebensdauer in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Feuchte und Temperatur nach dem verifizierten PMA-Lebensdauermodell.

Bild 62 zeigt den Zusammenhang dreidimensional grafisch. Man erkennt den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der PMA-Lebensdauer und den Einflussfaktoren Feuchte und Temperatur.

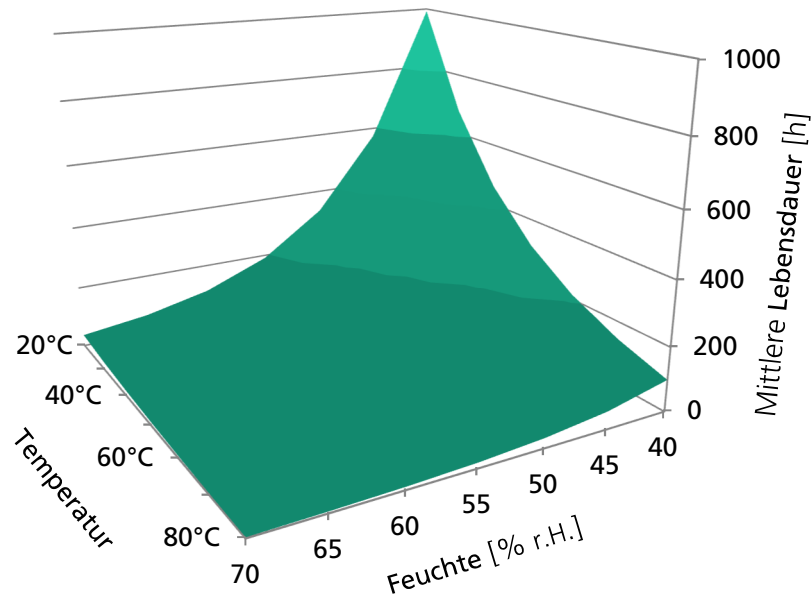


Bild 56: 3d-Darstellung der mittleren Lebensdauer über Temperatur und Feuchte

Mithilfe zweier Diagramme können die mittleren Lebensdauern schnell und unkompliziert ermittelt werden. So zeigt Bild 57 die mittleren Lebensdauern der PMA über der Feuchte bei unterschiedlichen Temperaturniveaus. Folgt man der jeweiligen Isotherme bis zur gewünschten Feuchte (Abszisse), kann man auf der linken Ordinate den Logarithmus der mittleren Lebensdauer Λ ablesen. Die rechte Ordinate zeigt die mittlere Lebensdauer in Stunden.

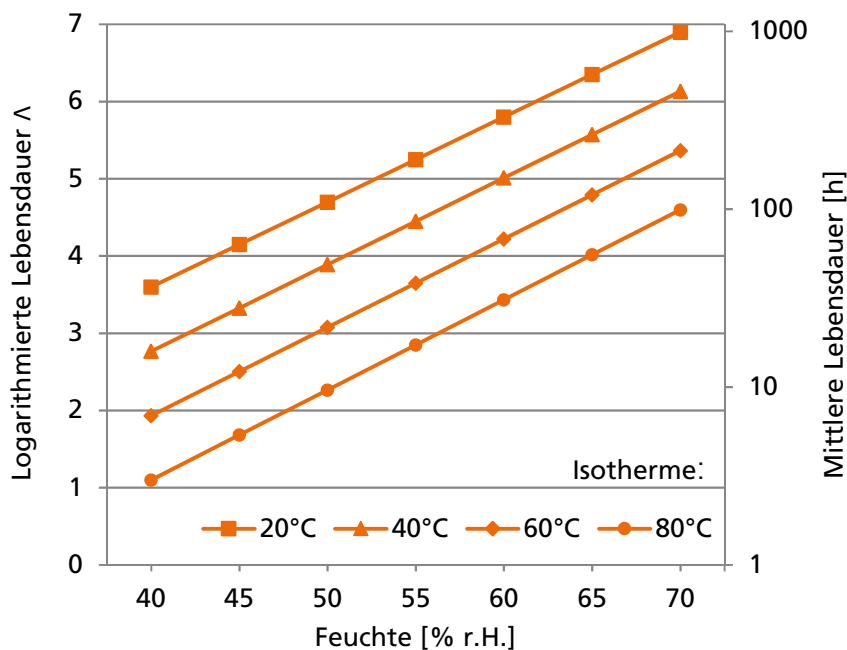


Bild 57: Mittlere PMA-Lebensdauer über Feuchte bei konstanten Temperaturen; folgt man einer Isotherme bis zu einer bestimmten Feuchte (Abszisse), kann auf der rechten Ordinate die mittlere Lebensdauer (L) in Stunden und auf der linken Ordinate der Logarithmus der mittleren Lebensdauer (Λ) abgelesen werden.

Analog hierzu zeigt Bild 58 die mittlere Lebensdauer über der Temperatur für verschiedene Niveaus der relativen Feuchte.

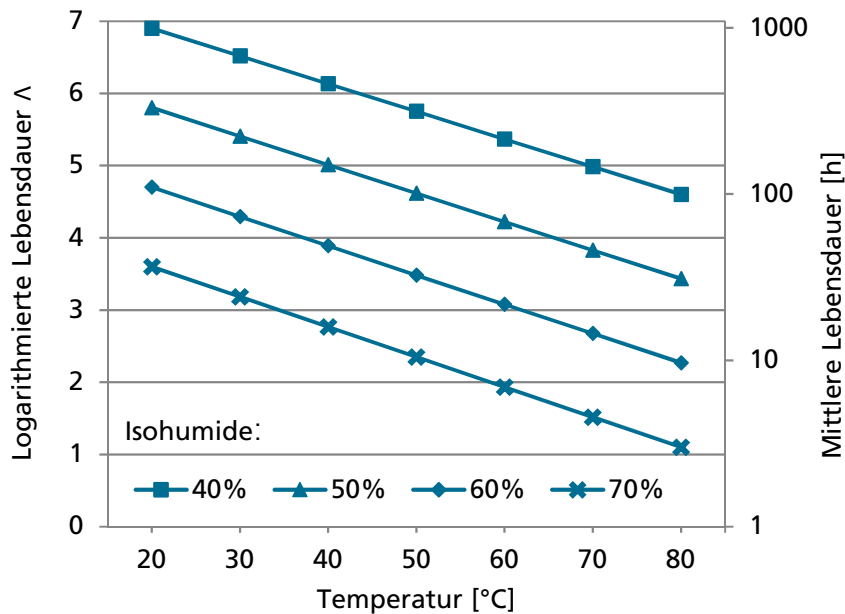


Bild 58: Mittlere PMA-Lebensdauer über Temperatur bei konstanten Feuchten; folgt man einer der Isohumiden bis zur gewünschten Temperatur (Abszisse), lässt sich auf einer der Ordinaten die mittlere Lebensdauer (L) in Stunden oder deren Logarithmus (Λ) ablesen.

5.10.2 Beschreibung der Verteilungsfunktion

Ausgehend von der mittleren Lebensdauer können mit Hilfe einer geeigneten Verteilungsfunktion statistische Größen bestimmt werden. Hierdurch lassen sich Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer einer Stichprobe in der Anwendung ableiten.

In Kapitel 5.8 konnte aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht abschließend geklärt werden, ob die Verteilungsfunktion besser durch eine Weibull- oder eine Log-Normalverteilung angenähert werden kann. Festzuhalten ist, dass eine Beschreibung mit beiden Verteilungsfunktionen grundsätzlich möglich ist. In Anbetracht des weiten Verbreitungsgrades und den Ergebnissen aus Kapitel 5.8 wird daher an einer drei-parametrischen Weibullverteilung zur Beschreibung des Ausfallverhaltens festgehalten.

Die allgemeine Definition der Ausfallwahrscheinlichkeit einer 3-parametrisch weibullverteilten Stichprobe ist in Formel (3.9) gegeben zu: $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T^*-t_0}\right)^b}$ [58].

mit der Zufallsvariable t , der nominellen charakteristischen Lebensdauer T^* , der ausfallfreien Zeit t_0 sowie dem Formparameter b . Eine allgemeine Übersicht über die Weibullverteilung ist bereits in Kapitel 3.1.2 gegeben. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf entsprechende Literatur [58] verwiesen.

Eine Weibullauswertung der normierten virtuellen Lebensdauern aus Kapitel 5.7 führt zu dem in folgendem Diagramm (Bild 59) dargestellten Ergebnis.

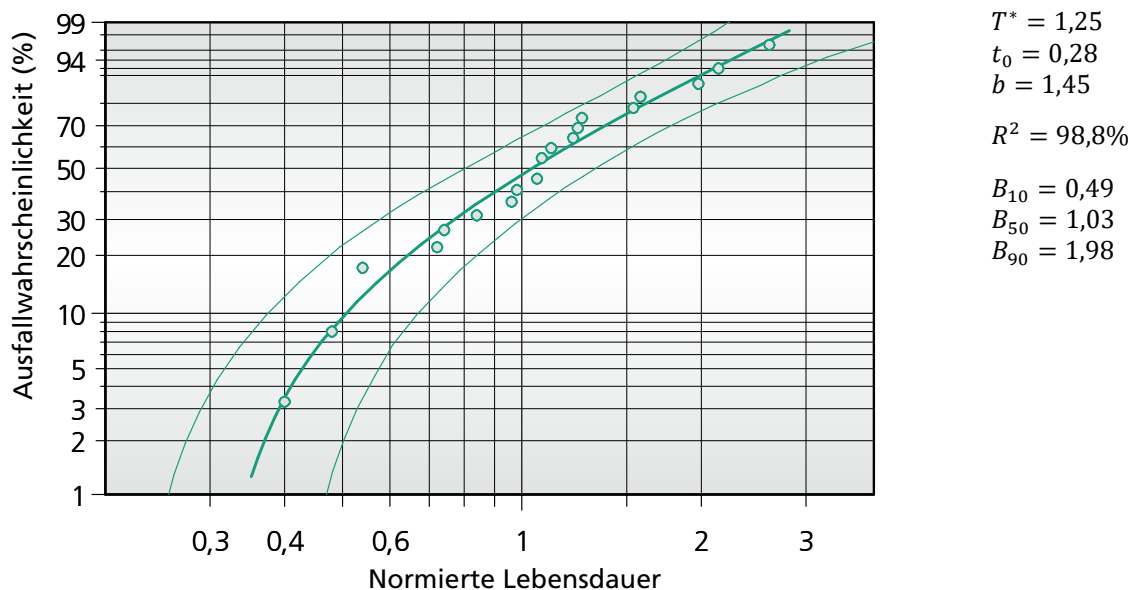


Bild 59: Verteilungsfunktion des verifizierten Lebensdauermodells auf die mittlere zu erwartende Lebensdauer bezogen.

Die mittlere Lebensdauer (B_{50}) der virtuellen Stichprobe liegt mit 1,03 knapp über dem zu erwartenden Wert von 1,0. Das bedeutet, dass das PMA-Lebensdauermodell die Lebensdauer der Stichprobe leicht unterschätzt. Die B_{10} -Lebensdauer liegt rund 50 % unterhalb der mittleren Lebensdauer. Die B_{90} -Lebensdauer, die Lebensdauer also, zu der 90 % der Stichprobe ausgefallen sind, liegt rund 100 % höher als die mittlere Lebensdauer. Die Ursache hierfür liegt in den im Experiment beobachteten Streuungen der Lebensdauer, unter teilweise identischen klimatischen Bedingungen. Diese Streuung ist somit eine Eigenschaft der PMA und kann durch statistische Methoden nicht reduziert werden. Die zu erwartenden Zeitdauern der 95 %- und 5 %-Vertrauensgrenze liegen jeweils rund 25 % unter bzw. 31 % über der Weibullkurve-Stichprobe. Wie in Kapitel 5.8 erwähnt, lassen diese Grenzen keine konkreten Rückschlüsse auf eine Stichprobe zu. Sie markieren einen Korridor, innerhalb dessen die Weibullverteilung der Grundgesamtheit mit 90 %iger Wahrscheinlichkeit liegt. Mit Hilfe einer größeren Stichprobe könnte dieser Korridor verkleinert werden. Würden im Extremfall alle Einheiten der Grundgesamtheit getestet, würde dieser Korridor exakt die Weibullverteilung der Grundgesamtheit beschreiben und keine Fläche mehr umschließen. Folglich gibt der Vertrauensbereich ein qualitatives Maß für die statistische Güte der Weibullverteilung an.

5.10.3 Beschreibung der PMA-Zuverlässigkeit und grafische Darstellung

Die Kombination aus mittlerer Lebensdauer und Verteilungsfunktion beschreibt das Ausfallverhalten der PMA unter klimatischen Einflüssen ganzheitlich.

Gemäß Formel (5.16) gilt für den Logarithmus der mittleren Lebensdauer:

$$\Lambda_{(H,T)} = -\frac{0,108}{\% r.H.} \cdot H - \frac{3,39 \cdot 10^2}{^{\circ}C} \cdot T - \frac{1,11 \cdot 10^{-4}}{\% r.H. \cdot ^{\circ}C} \cdot H \cdot T + 11,98$$

Somit folgt nach Gleichung 4.7 die mittlere Lebensdauer in Stunden:

$$L_{(H,T)} = e^{\frac{0,108}{\% r.H.} H - \frac{3,39 \cdot 10^2}{^{\circ}C} T - \frac{1,11 \cdot 10^{-4}}{\% r.H. \cdot ^{\circ}C} H \cdot T + 11,98} \quad (5.17)$$

Anhand der Verteilungsfunktion aus Kapitel 5.10.2, welche in Bild 59 dargestellt ist, lässt sich anschließend die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Stichprobe zum Zeitpunkt t bestimmen:

$$F_{(t)} = 1 - e^{-\left(\frac{t - 0,28 L_{(H,T)}}{0,97 L_{(H,T)}}\right)} \quad (5.18)$$

5.10.4 Demonstration anhand eines Beispiels

Anhand eines Beispiels soll im Folgenden die Anwendung des verifizierten Lebensdauermodells grafisch demonstriert werden. Gesucht wird der Zeitpunkt, den mit 95 %iger Aussagewahrscheinlichkeit 90 % einer Stichprobe, welche bei 60 % r. H. und einer Temperatur von 60 °C betrieben wird, überleben.

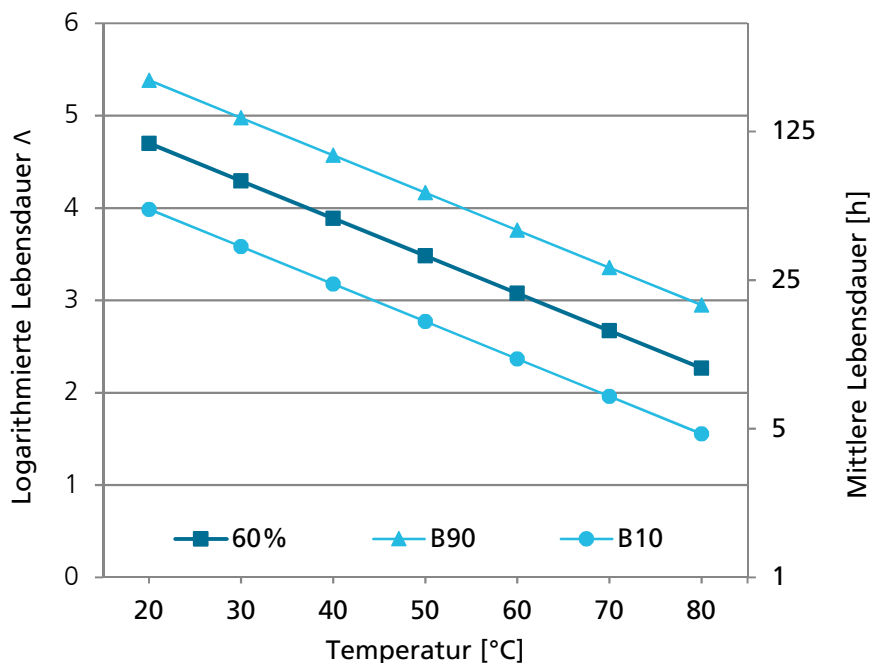


Bild 60: Zu erwartende Lebensdauer der PMA bei 60 % r. H. in Abhängigkeit der Temperatur, der Ausfallwahrscheinlichkeit und des 90 %-Vertrauensbereichs der B10-Lebensdauer.

Mit Formel 5.17 kann die mittlere Lebensdauer zu $L_{(H,T)} = 21,7 \text{ h}$ bestimmt werden. Eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $R_{(t)} = 1 - F_{(t)} = 0,9$ entspricht einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 %. Die Weibullverteilung der getesteten virtuellen Stichprobe (Bild 59) bestimmt die Lebensdauer bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von $F_t = 10 \%$ zu $B_{10} = 0,49 \cdot L = 10,6 \text{ h}$. Es ist ferner bekannt, dass die 95 %-Vertrauensgrenze der B_{10} -Lebensdauer um ca. 25 % unter dieser liegt. Folglich ergibt sich eine entsprechende Lebensdauer von $B_{10(60,60,95\%)} = 8 \text{ h}$.

Die angestellten Berechnungen sind in Bild 60 dargestellt. Die dunkelblaue Linie mit quadratischen Markern markiert die zu erwartende mittlere Lebensdauer bei einer Feuchte von 60 % über den Temperaturbereich von $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die hellblauen Linien geben die B_{10} - bzw. B_{90} -Lebensdauern über den Temperaturbereich an (runde bzw. dreieckige Marker). Grau hinterlegt ist der 90 %-Vertrauensbereich um die B_{10} -Lebensdauer dargestellt. Die untere Grenze des Vertrauensbereichs markiert hierbei die 95 %-Vertrauensgrenze. Zu beachten ist die logarithmische Teilung der rechten Ordinate, welche die Lebensdauern in Stunden angibt.

Die grafische Darstellung der 10 %-Ausfallwahrscheinlichkeit und des 90%-Vertrauensbereiches verdeutlicht, dass die Streuung der PMA-Belastbarkeiten schwerer wiegt als die Modellungenauigkeit aufgrund der begrenzten Stichprobengröße. Mit Hilfe der grafischen Darstellung und den in den Gleichungen 5.16 bis 5.18 dargestellten Berechnungen kann für eine relative Feuchte von 60 % die Lebensdauer der betrachteten PMA abgeschätzt werden. Für andere Feuchtwerte können die entsprechenden Dauern analog bestimmt werden.

6 Diskussion und Fazit

Nachfolgend werden verschiedene Aspekte des vorgestellten Ablaufplans, der Messwerterfassung, inklusive des Step Stress Monitorings und des resultierenden Lebensdauermodells für PMA grundlegend diskutiert. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte wurden bereits in den jeweiligen Unterkapiteln des vorangegangenen Kapitels erörtert, so dass diese nachfolgend lediglich zusammenfassend erwähnt werden.

6.1 Vorgehensweise

Bisherige Arbeiten, die Leckströme in PMA oder Einflüsse auf deren Lebensdauer untersuchten, lassen sich verallgemeinernd in zwei Gruppen einteilen. So befasst sich ein Teil der Arbeiten mit grundlegenden Untersuchungen zu den wirkenden chemischen und physikalischen Mechanismen im Inneren der PMA und leitet hieraus mathematische Modelle zur Beschreibung dieser Vorgänge ab [29, 30, 31, 42]. Demgegenüber stehen Arbeiten, die Fehlermechanismen nicht explizit untersuchen, sondern direkt eine Korrelation zwischen den wirkenden Einflussfaktoren und der Dauer bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums formulieren. Diese, in der Regel direkt von den PMA-Herstellern vorangetriebenen, Arbeiten beschreiben häufig sehr große Testreihen mit mehreren 100 Proben. Auffallend ist in diesem Zusammenhang, dass die Hersteller der PMA für ihre Arbeiten nur sehr begrenzt Informationen zum zeitlichen Verlauf der Versagensmechanismen aus bekannten Quellen nutzen [4, 35, 36] und diese auch nicht selbst erfassen. Somit wird zwar der experimentelle Aufwand der einzelnen Messung reduziert, der zeitliche und monetäre Aufwand hingegen bleibt nahezu unverändert.

Hierin unterscheidet sich die vorliegende Arbeit grundlegend. So wurde das Ziel der vorliegenden Arbeit, für einen bestimmten Typ PMA den Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren und der zu erwartenden Lebensdauer herzustellen, dadurch erreicht, dass eine Methodik entwickelt wurde, die es erlaubt, vorhandenes Wissen zu den Ausfallmechanismen und ihrem zeitlichen Verlauf in den Modellbildungsprozess einzubinden. Hierdurch konnte auf eine erneute umfangreiche statistische Untersuchung der Kausalität und Korrelation zugunsten wirtschaftlicher Faktoren verzichtet werden. So wurde bereits zur Formulierung des qualitativen Modells (Kapitel 5.4) auf die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge zurückgegriffen und die Charakteristik der Korrelation zwischen Einflussfaktoren und Lebensdauer formuliert. Durch die frühe Adaption dieses Wissens konnte im weiteren Verlauf auf eine umfangreichere experimentelle Untersuchung zur Quantifizierung der Zusammenhänge verzichtet werden, ohne die Abbildegenauigkeit des Lebensdauermodells zu reduzieren.

Voraussetzung für die Übernahme der qualitativen Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und PMA-Lebensdauer ist – neben einer Betrachtung der Plausibilität – der qualitative Vergleich

der gemessenen Leckstromverläufe mit Ergebnissen vorangegangener Arbeiten. Hierin unterscheidet sich die vorliegende Arbeit erneut von den bisherigen Arbeiten, die konkrete Lebensdauermodelle für PMA beschreiben.

In diesen wurden große Mengen von Stichproben (z. B. [36]: $n > 1000$) sukzessive getestet und die erreichten Lebensdauern auf Korrelation mit den Einflussfaktoren untersucht, ohne jedoch den zeitlichen Verlauf der Degradation zu erfassen und zu analysieren.

Demgegenüber wurden in dieser Arbeit alle Leckstromverläufe während der jeweiligen Untersuchungen kontinuierlich erfasst. Dies ermöglichte den Nachweis, dass die in vorherigen Arbeiten beschriebenen Verläufe denen in dieser Arbeit ermittelten entsprechen und sich somit auch die getroffenen Annahmen zu den Fehlermechanismen und Degradationsverläufen übertragen lassen.

6.2 Messwerterfassung

In allen bislang bekannten Arbeiten wurden die Proben während der jeweiligen Tests stets kontinuierlich gleichbleibend belastet. Darüber hinaus untersuchte lediglich Balke [18] den Einfluss eines kombinierten Gleichstrom-Wechselstrom-Signals auf die Proben. Die Mehrzahl der Arbeiten beschäftigte sich hingegen mit den Auswirkungen eines elektrischen Gleichfeldes auf die Proben bei überlagertem Temperatur- oder Feuchteinfluss.

Da die elektrische Belastung in adaptronischen Anwendungen überwiegend aus überlagerten Gleich- und Wechselspannungsanteilen besteht, wurden im Rahmen der qualitativen Tests bewusst verschiedene elektrische Signale untersucht und bewertet. Da sich bei allen im Rahmen der Vortests durchgeführten Messungen ein qualitativ gleiches Bild in Hinblick auf die Auswirkungen des elektrischen Anregungssignals ergab, konnte im weiteren Verlauf der Arbeit die elektrische Belastung auf ein einziges Anregungssignal reduziert werden.

Die Verwendung der Sawyer-Tower-Kreise ermöglicht eine Messwerterfassung bei gleichzeitiger Belastung der Proben. Hieraus resultiert eine ebenfalls kontinuierliche Aufzeichnung der Leckströme. Diese war zum einen die Grundlage zum Abgleich mit bekannten Leckstromverläufen und damit zur Identifikation relevanter Versagensmechanismen. Zum anderen ermöglichte die kontinuierliche Messwerterfassung die Entwicklung des Step Stress Monitorings zur Verifizierung. Die beobachteten Leckstromverläufe während der quantitativen Tests entsprachen qualitativ den Verläufen, wie sie auch in [4, 35] ermittelt wurden. Da die unterschiedlichen Quellen häufig unterschiedliche Typen von PMA sowie flächige Aktoren betreffen, ist davon auszugehen, dass die in dieser Arbeit gezeigten Verläufe charakteristisch für piezokeramische Aktoren auf Basis von PZT unter Feuchteinfluss sind. Daher ist anzunehmen, dass sowohl die Messwerterfassung als auch der Ablaufplan zur Entwicklung eines Lebensdauermodells auf andere PMA (PZT) übertragbar sind.

6.3 Streuung der Belastbarkeit

Die statistische Auswertung der im Experiment (Kap. 5.7) gewonnenen PMA-Lebensdauern ergab, dass aufgrund der natürlichen Streuungen der PMA-Belastbarkeit die Genauigkeit des Lebensdauermodells unabhängig vom Stichprobenumfang nicht nach Belieben gesteigert werden kann.

Allgemein gilt, dass die Belastbarkeit und damit auch die Lebensdauer von technischen Erzeugnissen Streuungen unterliegen. Die Ursache ist bekanntermaßen in Herstellertoleranzen sowie Schwankungen der Qualität von Rohstoffen und Halbzeugen zu suchen. Mit Hilfe geeigneter Verteilungsfunktionen, z. B. der Weibullverteilung, können die entsprechenden Streuungen beschrieben werden. Die im Rahmen der quantitativen Tests beobachteten Streuungen überstiegen die zu Beginn der Arbeiten erwarteten erheblich. Die statistische Auswertung der Daten gestaltete sich hierdurch komplexer als erwartet.

Es wurde daher ein mehrstufiger Ansatz gewählt, bei dem alle getesteten PMA, unabhängig von den klimatischen Bedingungen, in die Berechnung der statistischen Größen einbezogen wurden.

Aus dem Vergleich der gewonnenen Leckstromkurven mit bekannten Arbeiten wurde geschlossen, dass die im Rahmen der Untersuchungen gezeigten Degradationsverläufe vergleichbar zu den bereits bekannten sind. Daher war davon auszugehen, dass die in verschiedenen Arbeiten gezeigten Zusammenhänge zwischen Temperatur, Feuchte und der PMA-Lebensdauer qualitativ auf die vorliegenden PMA übertragbar sind.

Basierend hierauf und ausgewählter Ergebnisse der quantitativen Tests wurde anschließend ein quantitatives Modell erstellt. Auf Basis der Hypothese, dass dieses Modell qualitativ richtig sei, lediglich die quantitativen Parameter einer Anpassung bedürfen, wurden anschließend die erzielten Lebensdauern derart ausgewertet, dass der statistische Fehler der Stichprobe durch Optimierung der Randpunkte des quantitativen Modells minimiert werden konnte. Es konnte im Rahmen der Verifizierung gezeigt werden, dass das entwickelte Lebensdauermodell die Stichprobe so gut abbildet, dass eine Reduktion der statistischen Ungewissheit nur mit einem größeren Stichprobenumfang realisiert werden könnte. Die Aussagekraft bezogen auf eine andere Stichprobe würde hierdurch jedoch nur geringfügig verbessert werden, da die Streuung der PMA-Belastbarkeit größere Abweichungen der Lebensdauern nach sich zieht als die statistische Ungewissheit.

Ähnlich dem Vorgehen in dieser Arbeit, ermittelte He [47, 48, 49] aus der Summe aller experimentellen Daten statistische Kennzahlen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass jede Parameterkombination / jeder Messpunkt von nur einer Messung repräsentiert wurde, was eine Beurteilung der auftretenden Streuung hinsichtlich ihrer Ursache unmöglich macht. In der vorliegenden Arbeit wurden einzelne Messpunkte hingegen mehrfach getestet. Durch die Analyse der entsprechenden Lebensdauerdaten konnten Schwankungen der PMA-Belastbarkeit eindeutig nachgewiesen und ihr quantitativer Anteil abgeschätzt werden.

6.4 Anwendung des Ablaufplans

Soll der in dieser Arbeit vorgestellte Ablaufplan zur Erstellung eines neuen PMA-Lebensdauermodells verwendet werden, muss dieser nicht zwangsweise vollständig befolgt werden. Je nach Ähnlichkeit der zu betrachteten PMA kann direkt auf bereits erarbeitetes Wissen zurückgegriffen werden. Im Folgenden soll dies an zwei hypothetischen Beispielen illustriert werden:

6.4.1 Hohe Ähnlichkeit zu den hier beschriebenen PMA

Die zu untersuchenden PMA weisen eine hohe Ähnlichkeit zu den in dieser Arbeit beschriebenen PMA vom Typ Ceramtec Sonox P505 auf. Hierbei könnte es sich z. B. um die gleichen Aktoren einer neueren Charge, die unter Umständen mit neuen Verfahren hergestellt wurden, handeln oder um PMA, die über andere Abmaße oder eine leicht veränderte chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials verfügen.

Da der wesentliche Aufbau und das grundlegende Material (PZT) unverändert bleibt, ist davon auszugehen, dass sowohl die Fehlermechanismen als auch die Einflüsse der unterschiedlichen Belastungsparameter auf die PMA-Lebensdauer mutmaßlich gleich sind. Unterschiede sind lediglich in der mittleren zu erwartenden Lebensdauer und evtl. der Streuung der Belastbarkeit zu erwarten. Es kann daher, aufbauend auf dem in dieser Arbeit entwickelten und verifizierten Modell, direkt mit dem Schritt der Verifizierung begonnen werden. Bei gezielter Gestaltung der SSMs kann aus den ersten Teilergebnissen der Messungen direkt auf die mittlere Lebensdauer bei beliebigen klimatischen Bedingungen und durch den Vergleich mehrerer Messungen auf die Streuung dieser geschlossen werden. Mit Hilfe der weiteren Verläufe der SSMs wird anschließend untersucht, ob die angenommenen Parameter zur Beschreibung der Einflüsse der klimatischen Lasten auch für die neue Stichprobe zutreffen oder ob diese einer Anpassung bedürfen. Der Stichprobenumfang ergibt sich direkt aus den Anforderungen des Kunden oder der Anwendung, liegt aber deutlich unter den bisher üblichen und auch unter dem, welcher dieser Arbeit zugrunde liegt.

6.4.2 Geringe oder unbekannte Ähnlichkeit zu den hier beschriebenen PMA

Sollen PMA eines gänzlich anderen Typs mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes beschrieben werden, müssen zusätzlich zur Bestimmung der quantitativen Parameter auch die grundlegenden Versagensmechanismen und -verläufe bewertet werden. So sollte zunächst durch Rücksprache mit dem Hersteller und durch Plausibilitätsbetrachtungen überprüft werden, ob der zu untersuchende PMA in der späteren Anwendung den gleichen Fehlermechanismen unterworfen sein wird, wie sie in dieser Arbeit thematisiert wurden. Nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung ist dies für alle auf PZT basierenden PMA, die keine spezielle Behandlung erfahren haben, um sie gegenüber Umgebungsfeuchte unempfindlich zu machen, anzunehmen.

In diesem Fall kann das qualitative Modell aus Kapitel 5.4 direkt übernommen und die Planung einer experimentellen Testreihe zur Bestimmung der Wirkung der Einflussfaktoren gestartet werden. Der notwendige Stichprobenumfang ergibt sich aus den Anforderungen an die Aussagewahrscheinlichkeit des späteren Modells. Die Auswertung der Daten erfolgt analog zum Vorgehen in

Kapitel 5.7 dieser Arbeit. Die anschließende Verifikation des Modells kann dann mit dem SSM durchgeführt werden.

Stehen die entsprechenden Ressourcen und Expertenwissen zur Verfügung, können durch eine Kombination der quantitativen Tests und der SSM Einsparpotenziale gehoben werden. Dies hängt jedoch vom Anwender und den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln und Ressourcen ab und obliegt seiner Einschätzung.

6.5 Einsparpotenzial gegenüber konventionellen Ansätzen

Der experimentelle Aufwand, der dieser Arbeit zugrunde liegt, ergibt sich aus den insgesamt drei Testreihen mit Stichprobenumfängen von 16, 21 und 4 Proben zu insgesamt 41 Proben. Durch gezielte Planung der jeweiligen Versuchsreihen konnte so für die untersuchten PMA eine modellhafte Beschreibung der zu erwartenden Lebensdauer in Abhängigkeit der wirkenden Umgebungslasten ermittelt sowie die Streuung der Belastbarkeit im Rahmen einer Weibullanalyse charakterisiert werden. Es ist ersichtlich, dass der in dieser Arbeit entwickelte Ablaufplan und das vorgestellte Vorgehen deutliches Einsparpotenzial gegenüber konventionellen Ansätzen zur Bestimmung der PMA-Zuverlässigkeit bieten, welche oftmals auf Untersuchungen von mehreren hundert [35] und in Extremfällen über eintausend [36] Proben beruhen.

Sollen zukünftig PMA untersucht werden, die Ähnlichkeiten zu den hier untersuchten PMA aufweisen, kann der experimentelle Aufwand, wie vorangegangen demonstriert, weiter reduziert werden, so dass das Einsparpotenzial weiter gesteigert werden kann.

6.6 Verwendung von PMA in adaptronischen Systemen

Es ist ersichtlich, dass die PMA-Lebensdauer sehr stark von den Umgebungsbedingungen, denen der PMA während des Betriebs ausgesetzt ist, abhängt. Von den bekannten und hier untersuchten Lasten nimmt die Umgebungsfeuchte eine dominante Stellung ein. Die beobachtete Lebensdauer konnte durch Erhöhen der relativen Luftfeuchte um mehrere Größenordnungen reduziert werden. Insbesondere bei Wechselwirkung mit Feuchte, kann auch eine hohe Umgebungstemperatur die PMA-Lebensdauer reduzieren.

Diesem Umstand ist während des Produktentstehungsprozesses vom Entwickler Rechnung zu tragen, indem bei zu erwartender hoher Belastung durch Umgebungsfeuchte ein entsprechend robuster PMA gewählt und gegenüber Feuchte geschützt wird oder aber die Einwirkung von Feuchte auf den PMA im Rahmen des Gesamtsystems durch konstruktive Maßnahmen vermieden wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Einflüsse von Umwelt- und Lastparametern auf PMA untersucht und quantifiziert sowie die in adaptronischen Anwendungen typische Lasten charakterisiert und möglichen Fehlermechanismen gegenübergestellt. Es wurde ein systematisches Vorgehen entwickelt und demonstriert, abhängig vom verfügbaren Expertenwissen ausstehende Daten zu erfassen, auszuwerten und zu verifizieren. Anschließend wurde gezeigt, dass die Weibullanalyse ein geeignetes Mittel darstellt, um die PMA-Zuverlässigkeit zu bestimmen und zu beschreiben.

Die untersuchten Parameter Feuchte, Temperatur und anregendes elektrisches Feld haben alle einen deutlichen Einfluss auf die Abnahme des Isolationswiderstandes und somit auf die Degradation der betrachteten PMA. Der Einfluss der relativen Feuchte ist dominant und imstande, die PMA-Lebensdauer um mehrere Größenordnungen zu reduzieren. Die verwendeten Sawyer-Tower-Kreise stellen ein geeignetes Messmittel dar, während des Betriebs der PMA die Degradation in Echtzeit zu messen. Der zeitliche Verlauf der Degradation lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. In der ersten, einer Startphase nimmt die Degradation progressiv zu. In der anschließenden Phase folgt die weitere Degradation einem logarithmischen Verlauf und verhält sich innerhalb des betrachteten Parameterbereichs qualitativ gleich, was darauf schließen lässt, dass die physikalischen und chemischen Prozesse, die letztlich zur Degradation führen, im gesamten Parameterbereich gleich sind.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurde ein strukturierter Ablaufplan entwickelt, welcher die Übernahme vorhandenen Expertenwissens in verschiedenen Stufen ermöglicht, und so den experimentellen Aufwand reduzieren hilft. Zur Verifizierung wird ein neuartiges Testverfahren, das SSM vorgestellt. Dieses nutzt stufenweise ansteigende Lasten an einzelnen Proben, um die Einflüsse der Lastparameter zu quantifizieren und so die Einflüsse statistischer Effekte auf die Ergebnisse zu reduzieren.

Der entwickelte Ablaufplan ist zur Zuverlässigkeitsbestimmung anderer PMA geeignet und erlaubt frühzeitig Erkenntnisse darüber, welche der in dieser Arbeit gewonnenen Zwischenergebnisse auf ein anderes System oder eine andere Anwendung übertragen werden können. Hierdurch können weitere Einsparpotenziale gegenüber konventionellen Ansätzen, zur Bestimmung der PMA-Zuverlässigkeit gehoben werden.

Der experimentelle Aufwand, der zur Bestimmung der PMA-Zuverlässigkeit in dieser Arbeit betrieben wurde, ist um mindestens eine Größenordnung geringer, als bei vergleichbaren vorangegangenen Arbeiten und lässt sich für zukünftige Untersuchungen weiter reduzieren indem bereits in früheren Phasen das SSM genutzt wird.

7.2 Ausblick

7.2.1 Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Belastung auf die Degradation

Die in dieser Arbeit vorgenommenen Vereinfachungen, z.B. über die gesamte Testdauer konstante Belastungen, treffen auf eine Vielzahl von realen Anwendungen. In [37] konnte gezeigt werden, dass die Degradation von PMA teilweise kurzzeitig reversibel ist. Berücksichtigt man dieses Vorwissen, ist davon auszugehen, dass das hier vorgestellte Lebensdauermodell die PMA-Lebensdauern in einigen Anwendungen unterschätzt.

Derzeit gibt es noch keine Arbeiten, die ein Modell zur Beschreibung des Einflusses von unterbrochenen oder zeitlich variablen Belastungen auf die Lebensdauer von PMA oder den Verlauf der Degradation darstellen. Es ist daher erstrebenswert, einerseits die Belastungen, die auf PMA in realen Anwendungen einwirken, genauer zu charakterisieren und hieraus Belastungskollektive, wie sie z. B. in der Betriebsfestigkeit seit vielen Jahrzehnten üblich sind [82], abzuleiten. Andererseits sollte der Zusammenhang von zeitlich variablen Belastungen – sowohl klimatischen als auch mechanischen/elektrischen – und Lastkollektiven auf die Degradation untersucht werden. Hierbei sollte im Speziellen eine Analyse der reversiblen und irreversiblen Anteile der Degradation stattfinden.

Mögliche, die Lebensdauer verlängernde Einflüsse könnten neben Pausenzeiten, also Zeiten, in denen der PMA nicht aktiv betrieben wird, z. B. auch Phasen mit geringerer Umgebungsfeuchte, erhöhter elektrischer Amplitude, geringerer elektrischer Offsetspannung oder höherer Arbeitsfrequenz und damit erhöhter Eigenerwärmung sein. In Anbetracht der gezeigten Fehlermechanismen ist unter Umständen eine Reduktion bereits eingetretener Degradation durch das zeitweise Anlegen eines entgegengesetzten elektrischen Feldes möglich. Auch hierzu liegen bislang jedoch keine Daten vor. In Hinblick auf die hohe Relevanz für den Anwender, die PMA-Lebensdauer mit einfachen regelungstechnischen Mitteln zu steigern, ist eine genaue Charakterisierung der Effekte sinnvoll.

7.2.2 Weiterentwicklung SSM

Das SSM stellt eine vielversprechende Methode zur Charakterisierung von Einflüssen auf die Lebensdauer von PMA dar, die es ermöglicht, statistische Einflüsse zu minimieren. Zwei Aspekte des SSM sollten zukünftig weiter untersucht werden: Zum einen sollten neue Erkenntnisse in Bezug auf den Verlauf der Degradation der PMA auf das SSM angewendet werden. Hierdurch könnte eine Verbesserung der Extrapolation der Degradationsverläufe ermöglicht werden. Diese würden im Umkehrschluss erlauben, die Anzahl der Stufen je Degradationsfenster zu erhöhen oder die kumulierte Degradation während des SSM zu reduzieren. Zwar beschreiben erste Arbeiten die unterschiedlichen Phasen des Degradationsverlaufs, über die genauen Ursachen und Mechanismen herrscht in der Literatur jedoch noch kein einheitliches Bild [40, 41].

Zum anderen sollte untersucht werden, inwieweit ein Screening-Verfahren auf Basis des SSM dazu genutzt werden kann, die Lebensdauer eines PMAs individuell vor dem eigentlichen Einsatz zu bestimmen. Hierzu müsste untersucht werden, wie hoch die Genauigkeit einer Degradationsprognose wäre und welche Faktoren die Aussagegenauigkeit relevant beeinflussen. So ist es denkbar, dass eine Charge von PMA vor der Montage im späteren System einem standardisierten kosten- und zeiteffizienten Screening unterzogen wird. Das Ergebnis der Tests erlaubt nicht nur eine Unterscheidung der PMA hinsichtlich ihrer relativen Widerstandsfähigkeit gegenüber den relevanten Einflussfaktoren, sondern könnte darüber hinaus eine PMA-individuelle quantitative Aussage zur zu erwartenden Rest-Lebensdauer in der späteren Anwendung ermöglichen.

Wie bereits erwähnt, wäre eine genauere Untersuchung der reversiblen Degradation sinnvoll. Im Rahmen eines Screeningverfahrens könnte dieses Wissen dazu genutzt werden, den Einfluss des Screeningverfahrens auf die spätere Lebensdauer zu minimieren. Im Umkehrschluss ermöglicht das SSM eine wirtschaftliche und von statistischen Einflüssen weitestgehend unabhängige Untersuchung eben jener reversiblen Degradation und die Lebensdauer positiv beeinflussender Effekt.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Hanselka, T. Melz, J. Nuffer. *Adaptronics – State of the Art and some Future Challenges*. Proceedings of the Actuator 2010, Bremen, 2010
- [2] D. Flaschenträger, J. Nuffer, D. Hofmann, J. Gäng, B. Bertsche. *Zuverlässigkeitsbewertung eines adaptronischen Systems zur aktiven Vibrationsminderung*, Konstruktion, 63. Jahrgang, Ausgabe 1 / 2, S. 52 ff, Springer VDI, Düsseldorf, 2011
- [3] H. Czichos, T. Saito, L. Smith. *Springer Handbook of Metrology and Testing*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2011, ISBN: 978-3-642-16641-9
- [4] R. Bindig, G. Helke. *Application of Piezoceramic Multilayer Actuators, Experiences and Solutions*. Proceedings of the Actuator 2000, Bremen, 2000
- [5] N. Safi, M. Sinn, J. Nuffer, D. Mayer, T. Pfeiffer. *Zuverlässigkeit piezokeramischer Folienmodule für energiautarken Systeme (Energy Harvesting)*. DVM-Bericht 903, Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme, Darmstadt, 2010
- [6] Datenblatt zu PI Ceramic P-876, Physik Instrumente GmbH & Co. KG, Lederhose, 2011
- [7] Onlinekatalog der PI Ceramic GmbH & Co. KG, Lederhose, P-876 DuraAct Patch Transducer, 2015 <http://www.piceramic.com/product-detail-page/p-876-101790.html> (22.05.2017)
- [8] K. Uchino und S. Takahashi. *Multilayer ceramic actuators*. Solid State & Materials Science, 1:698-705, 1996
- [9] K. Nagata, J. Thongrueng. *Effect of Temperature, Humidity and Load on Degradation of Multilayer Ceramic Actuator*. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 32, 1278 - 1281, 1998
- [10] S. R. Winzer, N. Shaker und A. P. Ritter. *Designing Cofired Multilayer Electrostrictive Actuators for Reliability*. J. Am. Ceram. Soc. Vol. 72, 2246 – 2257, 1989
- [11] *First Steps towards Piezoaction*. Piezomechanik GmbH, München, 2010
http://www.piezomechanik.com/introduction/?jumpurl=fileadmin%2Ffilestorage%2FKataloge%2Fen%2FPiezomechanik_Katalog_E_web_10-05-2010.pdf&juSecure=1&locationData=2%3Apages%3A2&juHash=0bd6b20e1fd29f26690e87a511127888e8e0cec9
(22.05.2017)
- [12] P. Pertsch, B. Broich, S. Richter. *Untersuchungen zur Zuverlässigkeit piezokeramischer Multilayer-Aktoren*. DVM-Bericht 903, Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptronischer Systeme, Darmstadt, 2010

- [13] W. Y. Pan, C. Q. Dam, Q. M. Zhang und L. E. Cross. *Large displacement transducers based on electric field forced phase transitions in the tetragonal (Pb_{0.97}La_{0.02}) (Ti,Zr,Sn)O₃ family of ceramics* J. Appl. Phys. Vol. 66, 6014 – 6023, 1989
- [14] T. Sakai, M. Ishikiriya und R. Shimazaki. *Durability of Piezoelectric Ceramics for an Actuator*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31, 3051 – 3054, 1992
- [15] Q. Jiang, E. C. Subbarao und L. E. Cross. *Grain Size Dependence of Electric Fatigue Behavior of Hot Pressed PLZT Ferroelectric Ceramics*. Acta Mater, Vol. 42, 3687 – 3694, 1994
- [16] U. Kumar, M. Randall, J. Hock und A. Ritter. *Reliability Studies on Electrostrictive Actuators*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, 802 – 808, 1994
- [17] D. C. Lupascu und J. Rödel. *Fatigue in Bulk Lead Zirconate Titanate Actuator Materials*. Advanced Engineering Materials, Vol. 7, 882 – 898, 2005
- [18] N. Balke. *Ermüdung von Pb(Zr,Ti)O₃ für unterschiedliche elektrische Belastungsformen*. Dissertationsschrift, TU-Darmstadt, 2006
- [19] J. Nuffer, D. C. Lupascu und J. Rödel. *Damage Evolution in Ferroelectric PZT Induced by Bipolar Electric Cycling*. Acta Mater, Vol. 48, 3783 – 3794, 2000
- [20] L. M. Eng. *Nanoscale domain engineering and characterization of ferroelectric domains*. Nanotechnology, Vol. 10, 405 – 411, 1999
- [21] N. Zhang, L. Li, Z. Gui. Frequency dependence of ferroelectric fatigue in PLZT ceramics. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 21, 677 – 681, 2001
- [22] Y. Wang, S.-X. Gong, H. Jiang und Q. Jiang. *Domain pinning and electric fatigue of ferroelectric ceramics*, Proceedings SPIE 2715, Smart Structures and Materials 1996, 329 – 337, 1996
- [23] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, *Grundlagen der Nanostelltechnik*, Lederhose, 2009, <https://www.yumpu.com/de/document/view/3934476/grundlagen-der-nanostelltechnik-pi> (22.05.2017)
- [24] T. Melz. *Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kryokühlern*. Dissertationsschrift. TU-Darmstadt. 2002
- [25] CeramTec GmbH. *Monolithic Multilayer Actuators. Operation and Applications*. Plochingen, 2014. https://www.ceramtec.com/files/mf_brochure-mma.pdf (22.05.2017)

- [26] W. J. Minford. *Accelerated Life Testing and Reliability of High K Multilayer Ceramic Capacitors*. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology. Vol. 5, 297 – 300, 1982
- [27] H. C. Ling und A. M. Jackson. *Correlation of Silver Migration with Temperature-Humidity-Bias (THB) Failures in Multilayer Ceramic Capacitors*. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology. Vol. 12, 130 – 137, 1989
- [28] R. Waser. *Dc Electrical Degradation of Perovskite-Type Titanates: I, Ceramics*. J. Am. Cer. Soc. Vol. 73, 1645 – 1653, 1990
- [29] B. M. Melnick, J. F. Scott, C. A. Paz De Araujo und L. D. McMillan. *Thickness dependence of D.C. leakage current in lead zirconate-titanate (PZT) memories*. Ferroelectrics, Vol 135, 163 – 168, 1992
- [30] J. Chen, H. Chen und J. Y. Lee. *An investigation on the leakage current and time dependent dielectric breakdown of ferroelectric lead-zirconate-titanate thin film capacitors for memory device applications*. Appl. Phys. Lett. Vol. 69, 4011 – 4013, 1996
- [31] H. N. Al-Shareef und D. Dimos. *Leakage and Reliability Characteristics of Lead Zirconate Titanate Thin-Film Capacitors*. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 80, 3127 – 3132, 1997
- [32] S. Zafar, B. Hradsky, D. Gentile, P. Chu, R. E. Jones und S. Gillespie. *Resistance degradation in barium strontium titanate thin films*. Journal of applied Physics, Vol. 86, 3890 – 3894, 1999
- [33] K. Uchino. *Materials Issues in Design and Performance of Piezoelectric Actuators: An Overview*. Acta Mater., Vol. 46, 3745 – 3753, 1998
- [34] K. Nagata, S. Kinoshita. *Effect of Temperature on Degradation of Multilayer Ceramic Actuator*. Ferroelectrics, Vol. 195, 163 – 166, 1997
- [35] B. Andersen, F. Jensen und S. Ouchouche. *Reliability of Piezoelectric Actuators at Extreme Operating Conditions*. Proceedings of the Actuator 2004, Bremen, 2004
- [36] P. Pertsch, S. Richter, D. Kopsch, N. Krämer, J. Pogodzik und E. Hennig. *Reliability of Piezoelectric Multilayer Actuators*. Proceedings of the Actuator 2006, Bremen, 2006
- [37] M. Stewart, M. Cain und P. Weaver. *Use of Piezoceramics as DC Actuators in Harsh Environments*. Proceedings of the Actuator 2008, Bremen, 2008
- [38] C. A. Randall, A. Kelnberger, G.Y. Yang, R.E. Eitel und T.R. Shrout. *High Strain Piezoelectric Multilayer Actuators—A Material Science and Engineering Challenge*. Journal of Electroceramics, 14, 177–191, 2005

- [39] I. P. Lipscomb, P. M. Weaver, J. Swingler, J. W. McBride. *The effect of relative humidity, temperature and electrical field on leakage currents in piezo-ceramic actuators under dc bias*. Sensors and Actuators A, Vol. 151, 179 - 186, 2009
- [40] D. Zheng, J. Swingler, P. Weaver. *Current leakage and transients in ferroelectric ceramics under high humidity conditions*. Sensors and Actuators A, Vol 158, 106 – 111, 2010
- [41] D. Zheng, J. Swingler, P. M. Weaver. *Electrical conduction mechanisms in piezoelectric ceramics under harsh operating conditions*, Sensors and Actuators A, Vol 167, 19 24, 2011
- [42] R. Gerson und H. Jaffe. *Electrical Conductivity in Lead Titanate Zirconate Ceramics*. J. Phys. Chem. Solids., Vol. 24, 979 – 984, 1963
- [43] C. J. Kevane. *Oxygen Vacancies and Electrical Conduction in Metal Oxides*. Physical Review, Vol. 133, 1431 – 1436, 1963
- [44] C. Ang, Z. Yu und L. E. Cross. *Oxygen-vacancy-related low-frequency dielectric relaxation and electrical conduction in Bi:SrTiO₃*. Physical Review B, Vol. 62, 228 – 236, 2000
- [45] A. Peláiz-Barranco, J. D. S. Guerra, R. López-Noda und E. B. Araújo. *Ionized oxygen vacancy-related electrical conductivity in (PbLa)(ZrTi)O₃ ceramics*. J. Phys. Vol. 41, 215503, 2008
- [46] H. A. Stoffregen, E. Abele, D. Flaschenträger, T. Melz. *Additive Manufacturing of Reliable Piezoelectric Actuator Modules*, Proceedings of the 4th Scientific Symposium PT-PIESA, Nürnberg, 2013
- [47] Z. He, H. T. Loh und E. H. Ong. *A Probabilistic Approach to Evaluate the Reliability of Piezoelectric Micro-Actuators*. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 54, 83 – 91, 2005
- [48] Z. He, H. T. Loh, M. Xie, and G. Guo. *A Reliability Model for Piezoelectric Actuators*. Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, 2005. IPEC, Vol. 2, 939 – 944, 2005.
- [49] Z. He, H. T. Long, M. Xie. *A two-dimensional probability model for evaluating reliability of piezoelectric micro-actuators*. Int. J. of Fatigue, Vol. 29, 245 – 253, 2007
- [50] PI Ceramic GmbH & Co. KG. *Reliability & Lifetime of Multilayer Piezo Actuators*. Lederhose, 2009

http://www.pi-usa.us/pdf/Piezo_Actuator_Lifetime_Test_Reliability_Results.pdf
(22.05.2017)
- [51] W. B. Nelson, Accelerated Testing, 2. Auflage, John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., USA, 2004, ISBN: 978-0-471-69736-7

- [52] J. Donovan, V. Loll und J. Punch. *Graphical Analysis and Guidelines for Step-Stress-Testing*. Proceedings of the RAMS 2003, IEEE Explore, Washington, DC, USA, 2003
- [53] R. K. Reddy, D. L. Dietrich. *A 2-Level Environmental-Stress-Screening (ESS) Model: A Mixed-Distribution Approach*. Transactions on Reliability, Vol. 43, 85 – 90, 1994
- [54] G. Yang. *Environmental-Stress-Screening Using Degradation Measurements*. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 51, 288 – 293, 2002
- [55] A. Birolini. *Reliability Engineering – Theory and Practice*. 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2010, ISBN: 978-3642149511
- [56] M. Silverman. *Summary of HALT and HASS Results at an Accelerated Reliability Test Center*. Proceedings of the RAMS 1998, IEEE Explore, Washington, DC, USA, 1988
- [57] R. Munikoti and P. Dhar. *Highly Accelerated Life Testing (HALT) for Multilayer Ceramic Capacitor Qualification*. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 11, 342 – 345, 1988
- [58] B. Bertsche und G. Lechner. *Zuverlässigkeit im Maschinenbau*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1999, ISBN: 978-3-540-34996-9
- [59] L. M. Leemis. *Reliability - Probabilistic Models and Statistical Methods*. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1995, ISBN: 978-0692000274
- [60] Messerschmitt Bölkow-Blohm. *Technische Zuverlässigkeit*. Springer, Berlin, 1986, ISBN: 978-3540167051
- [61] H. Hanselka, K. Wolf, X. Cao. *Vorlesungsskript: Zuverlässigkeit im Maschinenbau*, TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, Darmstadt, 2005
- [62] H. O. Georgii. *Stochastik*, 2. Auflage. Walter De Gruyter, Berlin, 2004, ISBN: 978-3110193497
- [63] G.-A. Klutke, P. C. Kiessler und M. A. Wortmann. *A Critical Look at the Bathtub Curve*. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 53, No.1. 2003
- [64] T. Cheng. *A Critical Discussion on Bath-tub Curve*. China Association for Technical Supervision Information

<http://bm.nsysu.edu.tw/tutorial/iylu/conferance%20paper/B035.pdf> (22.05.2017)
- [65] F.-B. Sun. *An Introduction of Burn-In and Environmental Stress Screening*. Proceedings of the RAMS 2013, IEEE Explore, Orlando, FL., USA 2013

- [66] G. F. Watson. *MIL reliability: a new approach*. IEEE Spectrum, Volume 29 Issue 8, Aug. 1992, Page 46-49, IEEE Press Piscataway, NJ, USA. 1992
- [67] K. L. Wong. *Off The Bathtub onto The Roller-Coaster-Curve*. Proceedings of the RAMS 1988, IEEE Explore, Washington, DC, USA, 1988
- [68] International Electrotechnical Commission, *Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*, Geneva, Switzerland, 2004
- [69] SN 29500, *Ausfallrate, Bauelement, Erwartungswert, Allgemeines*, Hausnorm der Siemens AG, München, 2004
- [70] Department of Defence, *Military Handbook 217-F: Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Washington D.C., 1990
- [71] E. Anton. *Elektrische Eigenschaften, Struktur und Depolarisationsverhalten von $\text{Bi}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3$ - $\text{Bi}_{1/2}\text{K}_{1/2}\text{TiO}_3$ -basierten bleifreien Piezokeramiken*. Dissertations-schrift, TU-Darmstadt, 2011
- [72] H. Janocha, M. Klein und K. Kuhnen. *Simultane Messung charakteristischer Kenngrößen von Piezoaktoren im Großsignalbetrieb*. Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik, Vol. 69, 399 – 403, Oldenbourg Verlag, 2002, ISSN (Print) 0171-8096
- [73] D. Flaschenträger, J. Nuffer. *A Lifetime Model for Piezoceramic Actuators in Adaptronic Systems*. Proceedings of the RAMS 2013, Orlando, USA, 2013
- [74] Internetauftritt des Landesgesundheitsdienstes Baden-Württemberg, 04.2015:

<http://www.gesundheitsamt-bw.de/oegd/Gesundheitsthemen/Arbeitsmedizin/Staatlicher-Gewerbearzt/Biologische-Belastungen/Seiten/Papierindustrie.aspx>
- [75] L. Bergau, Flugmedizin: Luftqualität an Bord von Verkehrsflugzeugen, Deutsches Ärzteblatt 1997, Vol. 94, Heft 49, A-3332 – 3334, Köln, 1997
- [76] Internetauftritt des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 04.2015:

<http://www.hlug.de/?id=7122>
- [77] W. Kleppmann. *Taschenbuch der Versuchsplanung*, 6. Auflage, Hanser Verlag, München, 2009, ISBN: 978-3446420335
- [78] D. C. Montgomery. *Design and Analyses of Experiments*, 7th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jearsey, 2009, ISBN: 978-1118146927

- [79] *VDI-Wärmeatlas*, 9. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, ISBN: 978-3-662-10743-0
- [80] D. A. van den Ende, B. Bos, W. A. Groen, L. M. J. G. Dortmans *Lifetime of piezoceramic multilayer actuators: Interplay of material properties and actuator design*. J. Electroceram, Vol. 22, 163 – 170, 2009
- [81] J. Nuffer, D. C. Lupasco, J. Rödel und M. Schröder. *Negligible oxygen liberation during bipolar electric cycling of ferroelectric lead zirconate titanate ceramics*. *Applied Physics Letters*, Vol. 79, 3675 – 3677, 2001
- [82] E. Haibach. *Betriebsfestigkeit*, 3. Auflage. Springer, Berlin, 2005, ISBN: 978-3540293637

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Aufbau eines DuraAct Flächenwandlers	5
Bild 2: Mikrorisswachstums in PMA	6
Bild 3: Thermografische Aufnahme eines PMA	10
Bild 4: Schematische Darstellung der Elektromigration	13
Bild 5: Mikroskopische Darstellung der Elektromigration	13
Bild 6: Histogramm und Empirische Dichtefunktion $f^*(t)$	19
Bild 7: Ausfall- und Überlebenswahrscheinlichkeit	20
Bild 8: Badewannenkurve	21
Bild 9: Wechselwirkung zwischen Belastung und Widerstandsfähigkeit	22
Bild 10: Roller-Coaster Curve	24
Bild 11: Aufbau eines einschichtigen Piezoaktors	29
Bild 12: Aufbau eines PMA	29
Bild 13: Aufbau zur Messung von Leckströmen im Gleichfeld	31
Bild 14: Sawyer-Tower-Kreis	31
Bild 15: Verwendeter Sawyer-Tower-Kreis (schematisch)	33
Bild 16: Messaufbau schematisch, dynamisch und statisch	34
Bild 17: PMA Sonox P505 32,4 x 7 x 7 mm ³	35
Bild 18: Abmaße des PMAs	36
Bild 19: Ausschnitt der PMA-Randschicht	36
Bild 20: Mikroskopische Aufnahmen eines PMAs	37
Bild 21: Ablaufplan für die Erstellung des Lebensdauermodells für PMA	39
Bild 22: Extremwerte der Luftfeuchte im März 2015 in Darmstadt	43
Bild 23: Einflüsse auf die PMA-Zuverlässigkeit	46
Bild 24: Degradation in PMA im Vergleich zur Anwendung	47
Bild 25: Elektrische Anregungssignale der Vortests	50
Bild 26: Ergebnisse Vortests (1)	52
Bild 27: Ergebnisse Vortests (2)	53
Bild 28: Ergebnisse Vortests (3)	54
Bild 29: Qualitatives Lebensdauermodell	56
Bild 30: Ergebnisse quantitative Tests (1)	62
Bild 31: Ergebnisse quantitativer Tests (2)	63
Bild 32: Ergebnisse quantitativer Tests (3)	63
Bild 33: Gültigkeitsbereich und Ankerpunkte	65
Bild 34: Ankerpunkte und linearen Regressionsgeraden	66
Bild 35: Λ -Werte des linearen Modells	67
Bild 36: Stress Strength zu unterschiedlichen Zeitpunkten	68
Bild 37: Weibull-Plot der Haupttests	71

Bild 38: Vergleich lineares und quadratisches Modell.....	75
Bild 39: Gegenüberstellung quadratisches und lineares Lebensdauermodell.....	76
Bild 40: Einfluss der Streuung auf die Ankerpunkte	77
Bild 41: Quantitatives Modell und optimierte Ankerpunkte im Vergleich.....	78
Bild 42: Untersuchung auf Normalverteilung	79
Bild 43: Lognormal-Verteilung des quantitativen Lebensdauermodells.....	80
Bild 44: Schematischer Verlauf eines Step Stress Monitorings.....	82
Bild 45: Charakteristischer Verlauf von Leckstrom-Kurven	82
Bild 46: Leckstrom-Kurven auf logarithmischer Zeitachse	83
Bild 47: Auswertung Step Stress Monitoring schematisch	83
Bild 48: Zeitlicher Verlauf des 1. Step Stress Monitorings.....	84
Bild 49: Auswertung des 1. SSMs	85
Bild 50: Zeitlicher Verlauf des 2. SSMs	87
Bild 51: Auswertung des 2. SSMs	88
Bild 52: Zeitlicher Verlauf des 3. SSMs	89
Bild 53: Auswertung des 3. SSMs	90
Bild 54: Zeitlicher Verlauf des 4. SSMs	92
Bild 55: Auswertung des 4. SSMs	93
Bild 56: 3d-Darstellung der mittleren Lebensdauer über Temperatur und Feuchte.....	96
Bild 57: Mittlere Lebensdauer über Feuchte	97
Bild 58: Mittlere Lebensdauer über Temperatur	97
Bild 59: Verteilungsfunktion des verifizierten Lebensdauermodells.....	98
Bild 60: Darstellung der Vertrauensbereich an einem Beispiel.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auslegung der Sawyer-Tower-Kreise	32
Tabelle 2: Versuchsplan Vortests Ceramtec SP505	50
Tabelle 3: Ergebnisse der Vortests bei hoher relativer Feuchte (85 %)	51
Tabelle 4: Ergebnisse der Vortests bei niedriger relativer Feuchte (5%)	51
Tabelle 5: Qualitative Bewertung der Einflüsse auf die PMA-Lebensdauer	60
Tabelle 6: Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Haupttests	61
Tabelle 7: Klimatische Bedingungen, Quelle und Λ -Wert der vier Ankerpunkte j	65
Tabelle 8: Λ' -Werte für verschiedene klimatische Bedingungen	66
Tabelle 9: Virtuelle Lebensdauer- und Λ -Werte	71
Tabelle 10: Sechs Ankerpunkte zur quadratischen Interpolation	74
Tabelle 11: Ergebnisse der quadratischen Interpolation	76
Tabelle 12: Optimierte Ankerpunkte	77
Tabelle 13: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 1. SSM	84
Tabelle 14: Ergebnisse des 1. SSMs: Einfluss der Temperatur	86
Tabelle 15: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 2. SSMs	86
Tabelle 16: Ergebnisse des 2. SSMs: Einfluss der Feuchte	87
Tabelle 17: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 3. SSMs	88
Tabelle 18: Ergebnisse des 3. SSMs	90
Tabelle 19: Klimatische Bedingungen und erwartete PMA-Lebensdauer des 4. SSMs	91
Tabelle 20: Ergebnisse des 4. SSMs	92
Tabelle 21: Vergleich des quantitativen und des verifizierten Modells	95